



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**Departamento de Ingeniería Mecánica**

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL**  
**MECÁNICA**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO  
DE LOS CDM DE LOS ELEMENTOS  
BÁSICOS DEL BÍPEDO PASIBOT**

**Autor: Bruno Gattamorta Monteagudo**  
**Director: Higinio Rubio Alonso**

**Julio de 2011**



*“We can’t solve a problem with  
the same mindset that created it”*

A.Einstein.



## **AGRADECIMIENTOS**

Primero me gustaría agradecer a todos los que han participado en esta andadura en el mundo del conocimiento. Aquellos con los que he compartido grandes alegrías y no pocos fracasos. Aquellos con los que he podido trabajar, disfrutar y aprender, gracias por el camino y por seguir ahí.

En concreto, las gracias a Mario por aguantar todas mis particularidades y mis constantes ausencias, sin olvidar el camino recorrido juntos en este proyecto. A César, por la infinita suma de apuntes aportados y a Jose, Goñi y el resto del comando por estar siempre dispuestos a tomar una caña.

También me gustaría agradecer a mi familia, por aguantar esta aparentemente interminable odisea y seguir apoyando ahora que alcanza su fin.

No podría olvidarme de la persona que más ha colaborado en el desarrollo de este proyecto. Sin él, esto no hubiera sido posible. Muchas gracias a mi tutor de proyecto, guía en los momentos de duda y oscuridad, Higinio Rubio Alonso.

Y por último, a una persona en concreto, por aguantar los constantes cambios de humor, las largas horas frente al ordenador y por aportar ese orden tan necesario en mi vida.

A todos vosotros, muchas gracias por todo.



Autor: Bruno Gattamorta Monteagudo.

Director: Higinio Rubio Alonso.

## EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 28 de JULIO de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE





## **RESUMEN**

El proyecto “Estudio del comportamiento de los CDM de los elementos básicos del bípedo Pasibot” se centra en el análisis de un diseño robótico en su proceso de creación y desarrollo. En el proyecto se hace un recorrido general por la historia de la robótica, destacando sus orígenes y distintos tipos de robots: activos, pasivos, humanoides, industriales, etc. Es aquí donde se cataloga que tipo de robot es con el que tratamos.

Una vez situados en el marco de trabajo, se entra en detalle con relación a qué es el Pasibot en realidad: un robot bípedo con un único grado de libertad que busca simular la marcha humana de la manera más sencilla posible. Se explica el funcionamiento, los elementos geométricos que permiten que se mueva y se detalla el proceso de análisis.

Por último, una vez realizadas las medidas en cuestión, se hace un análisis de los valores alcanzados. Con estos valores se hace un seguimiento a los objetivos planteados, se confeccionan unas conclusiones y se proponen trabajos futuros con el fin de mejorar el Pasibot y hacer del mismo una realidad tangible.

**Palabras clave:** CDM (centro de masas), Robot bípedo, Pasibot, robot activo, robot pasivo.



---

## **ABSTRACT**

The Project in question “Estudio del comportamiento de los CDM de los elementos básicos del bípedo Pasibot” focuses on the analysis of the design of a robot. The focus is on the process of the creation and development of the robot Pasibot. Within the project, there is a time line exposition throughout the world of robotics, detailing which have been the origins, distinguishing what are the different robot types and focusing on which type encloses our robot.

Once situated in the corresponding work plane, it is time to get into details relating to what Pasibot is in reality: a biped robot with only one degree of freedom. This robot tries to simulate the human gait in the simplest manner possible. The geometrical elements that make the robot possible, such as the Chebyshev, stabilizer and the extension, are explained in detail in this process.

Finally, once the measurements in question have been finished, an analysis of the data in detail is exposed. With these values and the stated analysis, we make an approach towards the proposed objectives, conclusions are stated, and to finish off, future projects are proposed in order to improve the Pasibot and make it a tangible reality.

**KEYWORDS:** COG (center of gravity), biped robot, passive dynamic walker, Pasibot.



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>21</b>
<b>1.1. MOTIVACIÓN.....</b>	<b>23</b>
<b>1.2. OBJETIVOS .....</b>	<b>26</b>
<b>1.3. Fases del proyecto.....</b>	<b>28</b>
<b>1.4 Estructura del documento. ....</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO II: INTRODUCCIÓN HISTÓRICA .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1. HISTORIA DE LA ROBÓTICA .....</b>	<b>33</b>
2.1.1.LINEA TEMPORAL.....	35
<b>2.2 LOS ROBOTS BÍPEDOS .....</b>	<b>41</b>
2.2.1. ROBOTS PASIVOS:.....	41
2.2.2. ROBOTS ACTIVOS .....	48
<b>2.3 TEORÍA DEL MOVIMIENTO BÍPEDO .....</b>	<b>55</b>
2.3.1. Movimiento del CDM .....	59
2.3.2. TIPOS DE MARCHA SEGÚN LOS ROBOTS. ....	61
<b>CAPITULO III: EL ROBOT PASIBOT.....</b>	<b>65</b>
<b>3.1. DESCRIPCIÓN DEL PASIBOT .....</b>	<b>67</b>
<b>3.2.Funcionamiento del mecanismo del Pasibot .....</b>	<b>69</b>
3.2.1. CHEBYSHEV .....	70
3.2.1. EXTENSIÓN .....	71
3.2.3. MECANISMO DE ESTABILIZACION .....	73
<b>CAPITULO IV: DESARROLLO DEL PROYECTO .....</b>	<b>77</b>
<b>4.1. DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....</b>	<b>79</b>
<b>4.2. PROCESO DE DISEÑO .....</b>	<b>82</b>
<b>4.3. PROCESO DE MEDIDA.....</b>	<b>87</b>
<b>4.4. ESTUDIO Y SIMULACION EN MSC ADAMS.....</b>	<b>89</b>
<b>4.5 ELEMENTOS ANALIZADOS: .....</b>	<b>91</b>
<b>Capítulo V: Análisis de los Resultados .....</b>	<b>95</b>
<b>5.1. Comparaciones del Fémur .....</b>	<b>100</b>
<b>5.2. COMPARACIONES POR EJES DE LA POSICIÓN DE LOS CENTROS DE MASA .....</b>	<b>106</b>
<b>5.3. COMPARACIÓN DE LAS VELOCIDADES LINEALES DE LOS CM.....</b>	<b>115</b>
<b>5.3. COMPARACIONES DE LAS ACELERACIONES LINEALES DE LOS CM .....</b>	<b>123</b>

---

<b>5.4. COMPARACIÓN DE LAS ACELEARCIONES LINEALES DE LOS CDM</b>	<b>130</b>
<b>5.6. COMPARACIONES DE LAS ACELERACIONES ANGULARES DE LOS CM</b>	<b>140</b>
<b><i>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES</i></b>	<b><i>151</i></b>
<b>6.1. CONCLUSIONES</b>	<b>151</b>
<b>6.2. FUTUROS DESARROLLOS</b>	<b>152</b>
<b><i>CAPÍTULO VII: PRESUPUESTO</i></b>	<b><i>155</i></b>
<b>7.1. PRESUPUESTO</b>	<b>155</b>
<b>7.2. COSTES</b>	<b>156</b>
<b><i>CAPÍTULO VIII: Bibliografía</i></b>	<b><i>161</i></b>

## ÍNDICE DE IMÁGENES

<i>IMAGEN 1.1.</i>	24
<i>a) Robot industrial en cadena de montaje.</i>	24
<i>b) Robot humanoide sentado.</i>	24
<i>IMAGEN 2.1. Escritor automático de Pierre Jaquet-Droz.</i>	34
<i>IMAGEN 2.2. Músicos de tamaño real creados por Jacques de Vauncansos</i>	34
<i>IMAGEN 2.3. Dibujo de la patente de la máquina de spray de Pollard y Roselund.</i>	36
<i>IMAGEN 2.4. Primer brazo mecánico de la historia.</i>	37
<i>IMAGEN 2.5. Robot T3.</i>	38
<i>IMAGEN 2.6. Imagen del robot Viking II de Nasa.</i>	38
<i>IMAGEN 2.7. Aibo, perro robot de Sony.</i>	39
<i>IMAGEN 2.8. Robot robodex 2000 de Sony jugando al futbol.</i>	40
<i>IMAGEN 2.9. Imagen del Wilson Walkie</i>	42
<i>IMAGEN 2.10. Modelos de McGeer y Wisse</i>	43
<i>IMAGEN 2.11. Movimiento de robot sin rodilla.</i>	44
<i>IMAGEN 2.12. Robot Toddler de MIT en proceso de levantar un pie.</i>	45
<i>IMAGEN 2.13. Imagen del robot Denise, del tamaño de una mujer media.</i>	46
<i>IMAGEN 2.14. Robot Ranger.</i>	48
<i>IMAGEN 2.15. Elektro, en comparación con un hombre de tamaño medio.</i>	50
<i>IMAGEN 2.16. El Wabot-2 con su antecesor el Wabot-1.</i>	51
<i>IMAGEN 2.17. La evolución de Honda.</i>	53
<i>IMAGEN 2.18. Robot Rh-0 y Rh-1 de la UC3M.</i>	54
<i>IMAGEN 2.19. Esquema de un paso humano.</i>	55
<i>IMAGEN 2.20. Representación de las fases de apoyo en un paso.</i>	56
<i>IMAGEN 2.21. Esquema del tiempo de permanencia en cada apoyo durante un paso.</i>	57
<i>IMAGEN 2.22. Esquema del punto de contacto y el CDM del pie.</i>	58
<i>IMAGEN 2.23. Esquema de la marcha bípoda de un humano.</i>	58
<i>IMAGEN 2.24. Esquema del desplazamiento vertical del CDM en la marcha.</i>	60
<i>IMAGEN 2.25. Esquema del desplazamiento lateral del CDM en la marcha.</i>	60
<i>IMAGEN 2.26. Polígono de sustentación.</i>	62
<i>IMAGEN 2.27. Movimiento de robot sin rodilla.</i>	63

<i>IMAGEN 3.1. Nomenclatura de los componentes del Pasibot .....</i>	<i>69</i>
<i>IMAGEN 3.2. Retrato de Chebyshev .....</i>	<i>70</i>
<i>IMAGEN 3.3. Representación del movimiento del chebyshev dentro del Pasibot.....</i>	<i>71</i>
<i>IMAGEN 3.4. Esquema de funcionamiento del pantógrafo .....</i>	<i>72</i>
<i>IMAGEN 3.5. Mecanismo completo del pasibot. ....</i>	<i>72</i>
<i>IMAGEN 3.6. Imagen del pasibot en el programa de simulación MSC ADAMS. ....</i>	<i>73</i>
<i>IMAGEN 3.7. Representación del paso. ....</i>	<i>74</i>
<i>IMAGEN 3.8. Pasibot.....</i>	<i>75</i>
<i>IMAGEN 4.1. Imagen inicial de arranque del programa Solid Edge ST. ....</i>	<i>79</i>
<i>IMAGEN 4.2. Gráfica explicativa de lo que aporta la tecnología síncrona. ....</i>	<i>80</i>
<i>IMAGEN 4.3. Vista del diseño de un elemento del Pasibot en Solid Edge.....</i>	<i>80</i>
<i>IMAGEN 4.4. Imagen inicial del programa MSC ADAMS .....</i>	<i>81</i>
<i>IMAGEN 4.5. Barra de herramientas para la simulación. ....</i>	<i>84</i>
<i>IMAGEN 4.6. Desplegable de resultados en la simulación. ....</i>	<i>85</i>
<i>IMAGEN 4.7. Ventana para guardar los datos de la simulación.....</i>	<i>85</i>
<i>IMAGEN 4.8. Desplegable que permite modificar la velocidad de giro del motor.....</i>	<i>86</i>
<i>FIGURA 4.9. Cuadro de dialogo para la medida de los elementos en cuestión. ....</i>	<i>87</i>
<i>IMAGEN 4.10. Vista de gráficas en el proceso de exportar a Excel.....</i>	<i>89</i>
<i>IMAGEN 4.11. Simplificación del fémur para Adams .....</i>	<i>90</i>
<i>IMAGEN 4.13. Fémur.....</i>	<i>91</i>
<i>Imagen 4.14. Rodilla .....</i>	<i>92</i>
<i>IMAGEN 4.15. Imagen de la tibia. ....</i>	<i>93</i>
<i>IMAGEN 4.16. Pie izquierdo .....</i>	<i>94</i>
<i>IMAGEN 5.1. Imagen inicial de MSC ADAMS ante una nueva simulación.....</i>	<i>97</i>
<i>IMAGEN 5.2. Ubicación de los CDM de los elementos básicos sobre el Pasibot.....</i>	<i>98</i>
<i>IMAGEN 5.3.....</i>	<i>100</i>
<i>IMAGEN 5.4.....</i>	<i>100</i>
<i>IMAGEN 5.5.....</i>	<i>101</i>
<i>IMAGEN 5.6.....</i>	<i>101</i>
<i>IMAGEN 5.7.....</i>	<i>102</i>
<i>IMAGEN 5.8.....</i>	<i>102</i>
<i>IMAGEN 5.9.....</i>	<i>103</i>
<i>IMAGEN 5.10.....</i>	<i>104</i>



<i>IMAGEN 5.10a.</i> .....	104
<i>IMAGEN 5.11.</i> .....	105
<i>IMAGEN 5.12.</i> .....	105
<i>IMAGEN 5.13.</i> .....	106
<i>IMAGEN 5.14.</i> .....	107
<i>IMAGEN 5.15.</i> .....	107
<i>IMAGEN 5.16.</i> .....	108
<i>IMAGEN 5.17.</i> .....	109
<i>IMAGEN 5.18.</i> .....	110
<i>IMAGEN 5.19.</i> .....	110
<i>IMAGEN 5.20.</i> .....	111
<i>IMAGEN 5.21.</i> .....	112
<i>IMAGEN 5.22.</i> .....	113
<i>IMAGEN 5.23.</i> .....	113
<i>IMAGEN 5.24.</i> .....	114
<i>IMAGEN 5.25.</i> .....	115
<i>IMAGEN 5.26.</i> .....	116
<i>IMAGEN 5.27.</i> .....	116
<i>IMAGEN 5.28.</i> .....	117
<i>IMAGEN 5.29.</i> .....	118
<i>IMAGEN 5.30.</i> .....	118
<i>IMAGEN 5.31.</i> .....	119
<i>IMAGEN 5.32.</i> .....	120
<i>IMAGEN 5.33.</i> .....	121
<i>IMAGEN 5.34.</i> .....	121
<i>IMAGEN 5.35.</i> .....	123
<i>IMAGEN 5.36.</i> .....	124
<i>IMAGEN 5.37.</i> .....	124
<i>IMAGEN 5.38.</i> .....	125
<i>IMAGEN 5.39.</i> .....	125
<i>IMAGEN 5.40.</i> .....	127
<i>IMAGEN 5.41.</i> .....	127
<i>IMAGEN 5.42.</i> .....	128

<i>IMAGEN 5.43.</i> .....	129
<i>IMAGEN 5.44.</i> .....	130
<i>IMAGEN 5.45.</i> .....	131
<i>IMAGEN 5.46.</i> .....	131
<i>IMAGEN 5.47.</i> .....	132
<i>IMAGEN 5.48.</i> .....	132
<i>IMAGEN 5.49.</i> .....	133
<i>IMAGEN 5.50.</i> .....	133
<i>IMAGEN 5.51.</i> .....	134
<i>IMAGEN 5.52.</i> .....	135
<i>IMAGEN 5.53.</i> .....	135
<i>IMAGEN 5.54.</i> .....	136
<i>IMAGEN 5.55.</i> .....	137
<i>IMAGEN 5.56.</i> .....	137
<i>IMAGEN 5.57.</i> .....	138
<i>IMAGEN 5.58.</i> .....	138
<i>IMAGEN 5.59.</i> .....	139
<i>IMAGEN 5.60.</i> .....	140
<i>IMAGEN 5.61.</i> .....	141
<i>IMAGEN 5.62.</i> .....	141
<i>IMAGEN 5.63.</i> .....	142
<i>IMAGEN 5.64.</i> .....	143
<i>IMAGEN 5.65.</i> .....	143
<i>IMAGEN 5.66.</i> .....	144
<i>IMAGEN 5.67.</i> .....	144
<i>IMAGEN 5.68.</i> .....	145
<i>IMAGEN 5.69.</i> .....	145
<i>IMAGEN 5.70.</i> .....	146
<i>IMAGEN 5.71.</i> .....	147
<i>IMAGEN 5.72.</i> .....	148
<i>IMAGEN 5.73.</i> .....	148

---

<b><i>TABLA 3.1. Propiedades del Al 2024-T351.....</i></b>	<b><i>67</i></b>
<b><i>TABLA 3.2. Elementos de los que consta el Pasibot.....</i></b>	<b><i>68</i></b>
<b><i>TABLA 4.1. Magnitudes medidas. ....</i></b>	<b><i>88</i></b>
<b><i>TABLA 4.2. ....</i></b>	<b><i>91</i></b>
<b><i>TABLA 4.3. ....</i></b>	<b><i>92</i></b>
<b><i>TABLA 4.4. ....</i></b>	<b><i>93</i></b>
<b><i>TABLA 4.5. ....</i></b>	<b><i>93</i></b>
<b><i>TABLA 7.1. Línea temporal del proyecto. ....</i></b>	<b><i>156</i></b>
<b><i>TABLA 7.2. Tabla detallada de los costes del proyecto. ....</i></b>	<b><i>157</i></b>



# CAPÍTULO I



## **CAPÍTULO I**

### **1.1. MOTIVACIÓN**

**“Durante la marcha, mas de 1000 músculos están sincronizados para moverse sobre 200 huesos alrededor de 100 articulaciones”**

**Prince et al.: Gait y Posture (1997)**

La robótica, desde el principio de los tiempos, ha sido la manera del ser humano de jugar a ser DIOS. ¿Cómo es esto de jugar a ser Dios? Pues intentando crear vida. La gran diferencia con la divinidad adorada por gran parte de la raza humana es la superioridad de esta, o los valores de superioridad que se le conceden, los cuales permiten dar vida a las cosas y quitársela. Quitar la vida es algo de lo cual el ser humano sabe mucho, en cambio, la parte más avanzada de la raza humana, la científica, es la que se centra en “crear” vida.

Para la creación de vida como tal se han cambiado las células y las neuronas por circuitos y cables. La mente de esta nueva vida está totalmente regida por el control humano, es decir, solo se pueden realizar acciones para las cuales han sido diseñados. Apenas ahora, los robots, con el desarrollo de la inteligencia artificial, son capaces de aprender sin haber sido anteriormente programados. De todos modos, tanto si son o no inteligentes, los robots, se basan en la creación de un elemento lo más parecido a un ser humano. El afán creacionista además tiene ese pequeño ingrediente de competitividad. El hombre busca crear algo más perfecto que el propio hombre, satisfaciendo así su afán de superioridad.

Cuando se habla del campo de la robótica, aparte de lo antes mencionado de la similitud de las máquinas con los humanos, hay que destacar la funcionalidad de las mismas. Para entender plenamente el panorama actual de desarrollos es necesario distinguir entre la robótica industrial y la robótica humanoide. Pero antes de continuar, definamos robot.

Según la RIA (Robot Industry Association): Un robot industrial es un manipulador reprogramable multifuncional diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o artefactos especiales, mediante movimientos variables programados, para la ejecución de tareas potencialmente muy diversas [8].

Esta definición es válida para los dos campos de investigación, ya que aunque sea industrial o humanoide, todo robot tiene una finalidad y una determinada funcionalidad.

### **Robótica industrial vs Robótica humanoide.**

La robótica industrial (de manipulación) nace de exigencias prácticas en la producción: es un elemento importante de la automatización flexible, encaminada a la reducción de costes.



a)

VS.



b)

**IMAGEN 1.1.**

**a) Robot industrial en cadena de montaje.**

**b) Robot humanoide sentado.**

**ROBOT HUMANOIDE:** Androide es el nombre que se le da al robot antropomorfo, es decir, que tiene forma o apariencia humana, y además imita algunos aspectos de su conducta de manera autónoma. La palabra androide posee un origen etimológico griego, al estar constituido por andro (hombre) y eides (forma) [7].

La robótica industrial, a fecha de hoy, está mucho más avanzada que la robótica humanoide. Esto es lógico y es debido a muchos años de evolución contra unos pocos. Los robots industriales llevan creándose desde siglos, y más aún después de la revolución industrial. Todo lo que aumente la productividad, reduzca los riesgos y aumente los beneficios, tendrá grandes avances en nuestra sociedad.

La robótica humanoide lleva desarrollándose básicamente desde mediados del siglo pasado. Se busca, como antes se ha mencionado, la creación de un “humano perfecto”, hecho a base de circuitos y controladores. El avance es continuo y cada día se llega más lejos.

Uno de los mayores inconvenientes de los robots humanoides es su peso y su consumo. En la gran mayoría de ellos el 30% de su peso se debe a los diferentes actuadores, consecuencia del elevado número de grados de libertad y un 25% a los



reductores acoplados a ellos. Si se consiguen diseñar nuevos mecanismos y cadenas cinemáticas, manteniendo el mismo número de grados de libertad que un robot humanoide, pero con menor número de actuadores y reductores, es posible reducir drásticamente el peso y el coste del robot. Por supuesto, asociado a este hecho, está la disminución del consumo de energía del robot, ya que la mayor parte de ésta es requerida por los motores. Esta mejora conllevaría una disminución de sus baterías, con la consiguiente disminución también del peso total del robot.

Para el diseño de los robots se debe intentar seguir las siguientes directrices:

- El robot bípodo debe ser capaz de realizar la dinámica andante.
- El robot debe ser autónomo en cuanto a los actuadores, sensores, el procesador y la fuente de alimentación.
- El coste debe de ser bajo.
- El robot debe tener menos actuadores que juntas.
- El robot debe utilizar actuadores rotativos.
- Se debe reducir al mínimo el peso total para tener un bajo consumo de energía.
- Para el diseño de la pierna del bípodo, en el plano sagital se deben utilizar mecanismos de barras articuladas.
- La tipología del robot debe tener forma antropomórfica.

Y debe cumplir los siguientes requisitos:

- El robot bípodo debe ser capaz de realizar la dinámica andante.
- El coste debe de ser bajo.
- El robot debe tener menos actuadores que juntas.
- El robot debe utilizar actuadores rotativos.
- Para el diseño de la pierna del bípodo, en el plano sagital se deben utilizar mecanismos de barras articuladas.

Este tipo de robots bípedos actualmente está en estudio por el *LARM (Laboratorio di Robotica e Meccatronica)* de la Universidad de Cassino bajo la supervisión del profesor Ceccarelli (el bípodo EP-WaR II y últimamente con los diseños de las piernas del humanoide CALUMA) y por el *MAQLAB (Laboratorio de Máquinas)* de la Universidad Carlos III de Madrid, con el diseño del bípodo PASIBOT.

Vistos los avances de las ramas y en especial de los humanoides, la motivación de este proyecto resulta clara, buscar, crear y perfeccionar un robot que simule el movimiento humano pero reduciendo actuadores, peso y consumo. Esto se toma como un primer paso para el posterior perfeccionamiento.

Una vez comentados los requisitos que ha de tener, la investigación y el desarrollo se presentan apasionantes y no demasiado sencillos. En este proyecto en concreto, se procede a tomar el testigo de los proyectos anteriores para continuar con el

desarrollo. A continuación nos hemos centrado en medir todos los elementos del robot y analizarlos con el fin de poner una piedra más en el camino y continuar esta evolución.

## **1.2. OBJETIVOS**

El desarrollo del robot bípedo “PASIBOT” ha sido un proyecto ambicioso en el campo de los robots de servicio.

En contraposición con la gran mayoría de robots humanoides actuales que presentan un gran número de grados de libertad, lo que repercute en elevado peso debido a los diferentes actuadores necesarios para producir el movimiento, con este robot se plantea un nuevo enfoque. Para ello se ha desarrollado un primer modelo de un solo grado de libertad, a través del cual se consigue una configuración muy ligera que reproduce el caminar humano de una forma fiable.

El objetivo que se persigue con la realización de este proyecto es el de avanzar en el proceso de optimización del diseño del robot bípedo PASIBOT, con el fin de conseguir un funcionamiento del mismo más estable y funcional.

Vista la motivación para desarrollar este proyecto como una continuación de un todo más complejo, el *objetivo principal* del presente Proyecto Fin de Carrera es el análisis del comportamiento dinámico de los centros de masas (CDM) de todos los elementos funcionales del bípedo PASIBOT, realizando un estudio más detallado de los elementos básicos del mismo.

La consecución del objetivo principal conlleva la superación de otros objetivos, que se podrían detallar como:

- Analizar el modelo fabricado de PASIBOT, asimilar los fundamentos teóricos de su diseño y entender el movimiento que se pretende conseguir.
- Modelar una copia exacta de PASIBOT utilizando herramientas informáticas, como son MSC ADAMS y Solid Edge ST. Esta réplica virtual permitirá realizar el análisis virtual del robot y de sus mejoras, sin necesidad de construir costosos prototipos físicos.

- Realizar análisis sobre el modelo virtual de PASIBOT para verificar la exactitud y validez de los elementos en funcionamiento. Estos análisis comparativos serán realizados utilizando un software de análisis de elementos finitos y un postprocesador que permite analizar los datos.
- Medir todos los elementos relativos a la dinámica del PASIBOT para poder recaudar suficiente información para su procesamiento posterior.
- Analizar los resultados obtenidos y extraer conclusiones con el fin de optimizar el funcionamiento del bípedo.

### **1.3. Fases del proyecto.**

Cuando pensamos en un proyecto de ingeniería, es necesario establecer unas fases orientativas con sus respectivos tiempos de realización. Con esto, somos capaces de planificar cada fase de manera independiente, o condicionada a una fase anterior, para así, en cada momento, conocer la siguiente fase sobre el cual debemos actuar. En el presente Proyecto de Fin de Carrera, al tratarse de un proyecto de investigación, las fases son relativas, ya que pleno proceso de investigación y desarrollo pueden surgir problemas y ser necesario modificar las fases. Aún así, es necesario planificar esta información que se exponen a continuación.

- I. Definición de objetivos:** En esta primera etapa se plantea la motivación y los objetivos que se han de alcanzar. Es necesario entender el funcionamiento de los elementos a estudiar para plantear así objetivos realistas.
- II. Estudios previos:** Se realiza un estudio de referentes, proyectos análogos o robots bípedos ya existentes en el mercado y se comprueban los avances más recientes en la materia.
- III. Concepto a desarrollar y posibles modificaciones:** En esta fase, el ingenio juega un papel importante. Se analizan los problemas y se plantean las posibles soluciones.
- IV. Montaje:** Se realiza el montaje del modelo previamente diseñado por otros compañeros en anteriores Proyectos de Fin de Carrera y se monta en el programa de simulación imitando en el mayor grado posible la realidad.
- V. Simulación y postprocesado:** Se realiza una evaluación de las propuestas desarrolladas. Se miden y analizan todos los parámetros de importancia y se procesan los resultados.
- VI. Conclusiones finales:** Se establecen unas reflexiones sobre el desarrollo del proyecto y el resultado final del mismo.

### **1.4 Estructura del documento.**

La estructura de este documento está dividida en ocho capítulos, la bibliografía (representada como el octavo capítulo) y un anexo con los resultados alcanzados.

### ***CAPÍTULO I.***

En el primer capítulo se realiza una breve reflexión en cuanto a la realización del proyecto. Se indican las motivaciones, los objetivos y las fases a seguir en el proceso. Se define la meta a alcanzar.

### ***CAPÍTULO II. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA.***

En este segundo capítulo aparece una breve introducción a la historia de los robots. Se destacan los proyectos iniciales en este ámbito y la evolución de los mismos a lo largo de una línea temporal. Por otro lado, se distingue entre las dos ramas de la robótica humanoide con mayor desarrollo en los últimos años y en los presentes: los robots activos y los robots pasivos. Por último, se hace una breve exposición sobre la marcha bípeda humana y los estudios y desarrollos realizados para pasarlo al ámbito de los robots bípedos.

### ***CAPÍTULO III. EL ROBOT PASIBOT.***

Comienza con una breve descripción del Pasibot. En el desarrollo se centra en los tres elementos constructivos del Pasibot de importancia: Chebyshev, Extensión y Estabilización. El conjunto de estos tres elementos constructivos permite la sencillez del robot en cuestión.

### ***CAPÍTULO IV. HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL PROYECTO.***

Como todo proyecto de ingeniería moderno, es necesario utilizar las herramientas informáticas que tenemos a disposición para facilitar nuestra labor. Se detalla el empleo de las herramientas informáticas, se indica paso a paso el procedimiento con un pequeño tutorial y se explica el modo de analizar la información. Por último, se incluye una descripción de la estructura de los elementos analizados.

## ***CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.***

Este capítulo es la parte central de la presente memoria y la más importante en el desarrollo de este proyecto. Consiste en analizar todos los datos medidos en las respectivas simulaciones y con las variaciones expuestas. Se han documentado y resaltado los elementos de importancia en un análisis detallado de cada elemento.

## ***CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.***

Una vez vistos los resultados y analizadas las gráficas, aquí se exponen las conclusiones. Se hace un análisis en relación a los objetivos propuestos y se valora si se han conseguido. Conjuntamente, se hará un análisis de los posibles proyectos de futuro que tuviesen relación directa con este proyecto, para así, poder seguir avanzando en el objetivo final del Pasibot.

## ***CAPÍTULO VII. PRESUPUESTO***

El presupuesto es un indicio de los elementos usados y los tiempos que han requerido. Consiste en procesar la información de cuánto cuesta cada herramienta utilizada: ingenieros, programas de simulación, proceso de análisis, proceso de redacción, etc. Da un valor preciso y toma en cuenta el uso real de las herramientas y sus correspondientes amortizaciones.

## ***CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA***

Se enumeran en esta parte de la memoria las referencias consultadas para la realización del proyecto y de la memoria del mismo.

## ***ANEXOS***

En el anexo figuran todas las gráficas que se han hallado y todos los datos numéricos del estudio.

## **CAPÍTULO II: Introducción histórica.**





## **CAPÍTULO II: INTRODUCCIÓN HISTÓRICA**

### **2.1. HISTORIA DE LA ROBÓTICA**

La robótica es un término que no es del todo comprendido. Es un término de dominio público, el cual, aunque se tiene una idea general de sus aplicaciones y de su potencial, pocos conocen el origen de la palabra o de las aplicaciones útiles que la hicieron surgir. La robótica actual se originó hace miles de años, de hecho, antiguamente se les conocía no como robots sino como autómatas.

La creación de autómatas/robots se debe a que el hombre desde el principio de los tiempos ha deseado crear vida artificial. Es decir, ser capaz de crear vida artificial para que les acompañara en su hogar y en su vida diaria, liberándolos de las tareas repetitivas, difíciles o pesadas para ser realizadas por un ser humano. Como bien sabemos, su desarrollo técnico no llegó a tanto y se suplió dicho deseo con esclavos, tratados casi como seres inertes y que meramente cumplían funciones útiles. Volviendo al origen, hay autores como J.J.C. Smart y Jasia Reichardt que consideran que el primer autómata de toda la historia fue creado por Dios, al cual conocemos como Adán. Este hecho, un poco fantasioso a mi parecer esclarece el concepto que a lo largo de los años ha llevado al avance de la robótica, en realidad, el fin es poder crear un hombre al igual que lo hizo Dios.

Los hombres creaban autómatas como un pasatiempo, eran creados con el fin de entretener a su dueño. Donde entendemos autómata como una máquina que siempre repite el mismo proceso. Los materiales que se utilizaban se encontraban al alcance de todo el mundo, tales como maderas resistentes, metales como el cobre y cualquier otro material moldeable, es decir, que no necesitara o requiriera de algún tipo de transformación para poder ser utilizado en la creación de los autómatas. El fin de estos primeros autómatas era principalmente utilizar la fuerza bruta para poder realizar sus movimientos. Fueron las primeras máquinas herramientas que facilitaban la labor de los humanos que las crearon.

Durante siglos el ser humano ha construido máquinas que imitan las partes del cuerpo humano. Los antiguos egipcios unían brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses. Estos brazos fueron operados por sacerdotes, quienes clamaban que el movimiento de estos era inspiración de sus dioses. Los griegos construyeron estatuas que operaban con sistemas hidráulicas, los cuales se utilizaban para fascinar a los adoradores de los templos.

Posterior a las civilizaciones antiguas, la próxima fecha de gran interés se data entre los siglos XVII y XVIII, entre los cuales se construyeron mecanismos muy ingeniosos, sobre todo en Europa, que tenían alguna característica de los robots. Los

comienzos de la robótica pueden fijarse hacia el año 1772, año en el que el ingenioso Pierre Jaquet-Droz inventa un escritor automático.



**IMAGEN 2.1. Escritor automático de Pierre Jaquet-Droz.**

Un poco más adelante en la historia aparece un personaje llamado Jacques de Vaucansos. Este desarrolla unos músicos de tamaño humano con el objetivo de divertir al público [9].



**IMAGEN 2.2. Músicos de tamaño real creados por Jacques de Vaucansos**

En 1805, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica que era capaz de hacer dibujos [10]. Una serie de levas se utilizaban como programa para el dispositivo

en el proceso de escribir y dibujar. Estas creaciones mecánicas de forma humana deben considerarse como inversiones aisladas que reflejan el genio de hombres que se anticiparon a su época. Hubo otras invenciones mecánicas durante la revolución industrial, creadas por mentes de igual genio, muchas de las cuales estaban dirigidas al sector de la producción textil. Entre ellas se puede citar la hiladora giratoria de Hargreaves (1770), la hiladora mecánica de Crompton (1779), el telar mecánico de Cartwright (1785), el telar de Jacquard (1801), etc. [5].

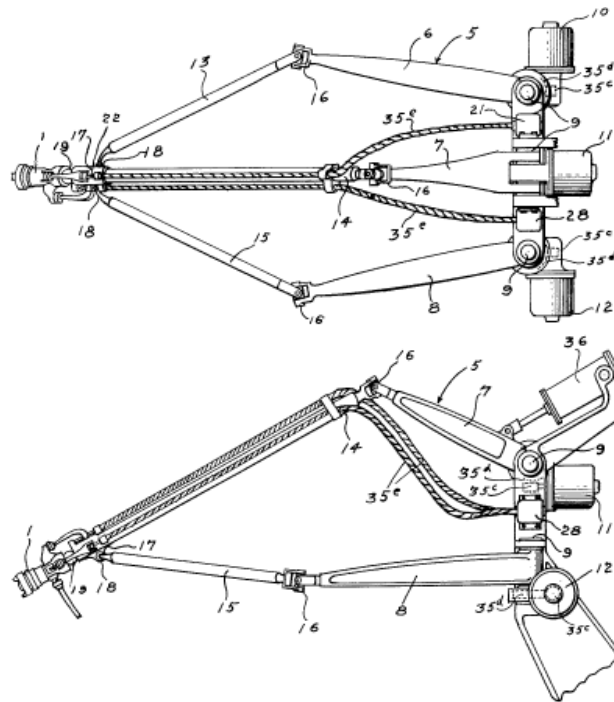
El desarrollo en la tecnología en la cual debemos incluir los poderosos computadoras electrónicas, los actuadores de control retroalimentados, transmisión de potencia a través de engranes, y la tecnología en sensores han contribuido a flexibilizar los mecanismos autómatas para desempeñar tareas dentro de la industria. Son varios los factores que intervienen para que se desarrollaran los primeros robots en la década de los 50's. La investigación en inteligencia artificial desarrolló maneras de emular el procesamiento de información humana con computadoras electrónicas e inventó una variedad de mecanismos para probar sus teorías.

Considerando que ya hemos alcanzado la época de los '50, época a partir de la cual se empieza a desarrollar de manera seria la robótica, pasaremos a explicar los robots en una línea temporal en vez de cómo se ha ido haciendo antes. Esto junto con unas imágenes explicativas dará una mejor sensación de la evolución de la robótica en los últimos años.

### **2.1.1.LINEA TEMPORAL**

**1920:** Karel Capek emplea por primera vez la palabra checa “robota” (“trabajo tedioso” en español) para referirse a un humanoide mecánico (no biológico). La palabra apareció en una obra de teatro en Londres, rápidamente el término se exportó a casi todos los idiomas del Mundo [11].

**1938:** Los americanos Willard Pollard y Harold Roselund fabrican la primera máquina para pintar con spray. La máquina fue fabricada para la empresa "DeVilbiss". A fecha de hoy aquella empresa sigue abierta.



**IMAGEN 2.3. Dibujo de la patente de la máquina de spray de Pollard y Roselund.**

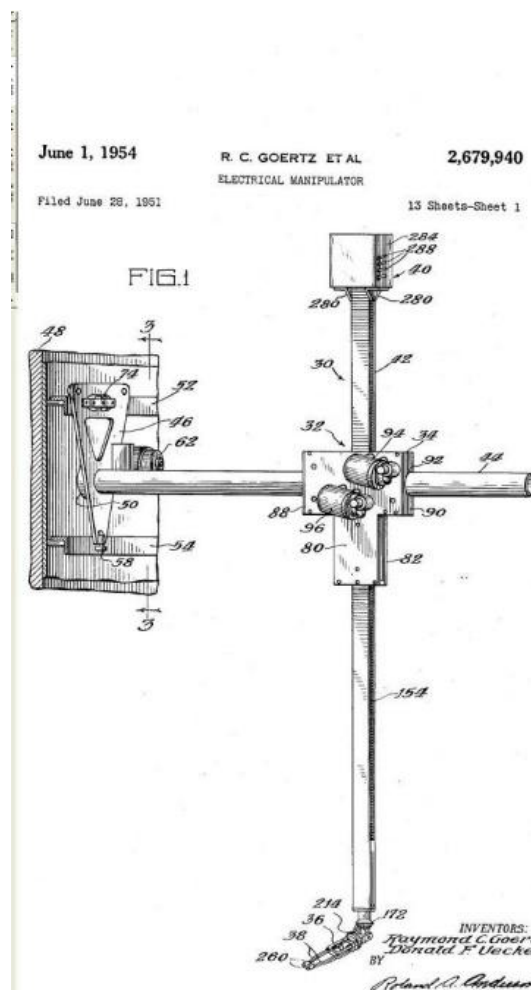
**1942:** Isaac Asimov publica las tres leyes de la robótica. Leyes que marcan la supeditación de los robots a la voluntad humana. Estas leyes se ponen de moda especialmente a finales de siglo XX, al introducirse la robótica en los hogares y plantearse un problema ético y de seguridad civil.

**Primera ley:** Un robot no puede hacerle daño a un ser humano, ni por omisión, permitir que un ser humano sufra daño.

**Segunda Ley:** Un robot debe obedecer a un ser humano siempre que sus órdenes no contradigan la Primera Ley.

**Tercera Ley:** Un robot debe proteger su propia existencia siempre y cuando dicha protección no interfiera con la Primera o Segunda Ley.

**1951:** Raymond Goertz diseña el primer brazo mecánico manejado a distancia para la Comisión de la Energía Atómica. La comisión se fundó en 1946, al final de la Segunda Guerra Mundial. La supremacía de los tanques en este conflicto puso de manifiesto la necesidad de llevar la revolución industrial del siglo XIX al Ejército.



**IMAGEN 2.4. Primer brazo mecánico de la historia.**

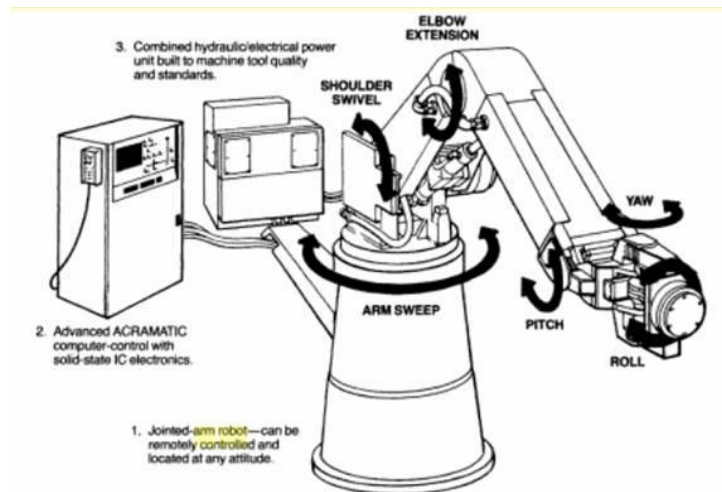
**1954:** George Devol diseña el primer robot programable comercial. Se comercializaría a partir de 1961. Más tarde el Sr. Devol fundaría "Unimation", la primera empresa de robótica de la historia.

**1959:** Se funda el Artificial Intelligence Laboratory en el MIT. El MIT ha sido la piedra angular en robótica universitaria durante el siglo XX, solo comparable al Robotics Institute de la "Carnegie Melon University".

**1959:** Sale al mercado el primer robot comercial. El robot se llamó "Versatran".

**1965:** Se funda el Robotics Institute en la "Carnegie Melon University". Hoy en día el "RI de la CMU" es como un "supermercado tecnológico", desarrollan cientos de robots gracias a una tremenda red de subvenciones.

**1973:** Aparece el primer robot controlado por un mini-ordenador, el robot es el "T3". Los "mini-ordenadores" de esta época pesaban habitualmente más 30 kilos.



**IMAGEN 2.5. Robot T3**

**1974:** Hay 3500 robots en uso en el mundo. Su utilidad de demostró en la Industria, el concepto de "Robot de Servicio" todavía no existía.

**1976:** El robot de la NASA "Viking II" aterriza en Marte. Disponía de un brazo robótico articulado.



**IMAGEN 2.6. Imagen del robot Viking II de Nasa.**

**1978:** Empiezan a surgir numerosas empresas dedicadas a la fabricación de robots para la industria. Solo en la década de los 80 y en EEUU surgen más de 10 empresas de gran capital social, fundadas desde sus respectivas casas matrices del sector Industrial.

**1986:** HONDA, la empresa Japonesa inicia un proyecto para construir un robot humanoide, su evolución y sus numerosos problemas se mantienen en secreto. Muchos científicos consideran que HONDA no logrará su objetivo, tanto en Estados Unidos como en Japón.



**1997:** HONDA presenta P3 un enorme robot humanoide. Cuando los resultados se hicieron públicos muchos investigadores que trabajaban en proyectos similares se quedaron atónitos, sus proyectos estaban a años luz de los resultados obtenidos por HONDA.

**1999:** SONY lanza "Aibo" un perro-robot. Los resultados en forma de publicidad gratuita que HONDA ha obtenido provocan una carrera de marketing tecnológico entre empresas de tecnología en Japón.



**IMAGEN 2.7.** Aibo, perro robot de Sony.

**2000:** SONY presenta un pequeño humanoide en la "Robodex 2000". Mientras los EEUU miran a sus robots en Marte, Japón mira a sus robots a la cara. Cada uno en su terreno es el rey de la robótica.



---

**IMAGEN 2.8. Robot robodex 2000 de Sony jugando al futbol.**

**2003:** Aquel robot humanoide de SONY, Qrio, se convierte en el primer humanoide comercial completamente autónomo capaz de correr. HONDA sería el primero en caminar, pero SONY el primero en correr. La carrera está abierta y otras empresas anuncian su propósito de unirse.

**2004:** Primera edición del "Darpa Grand Challenge". La guerra de Irak de 2003 y sus numerosas bajas puso en evidencia la necesidad de reducir las bajas militares estadounidenses en futuros conflictos. Se multiplica la financiación de este tipo de proyectos [6].



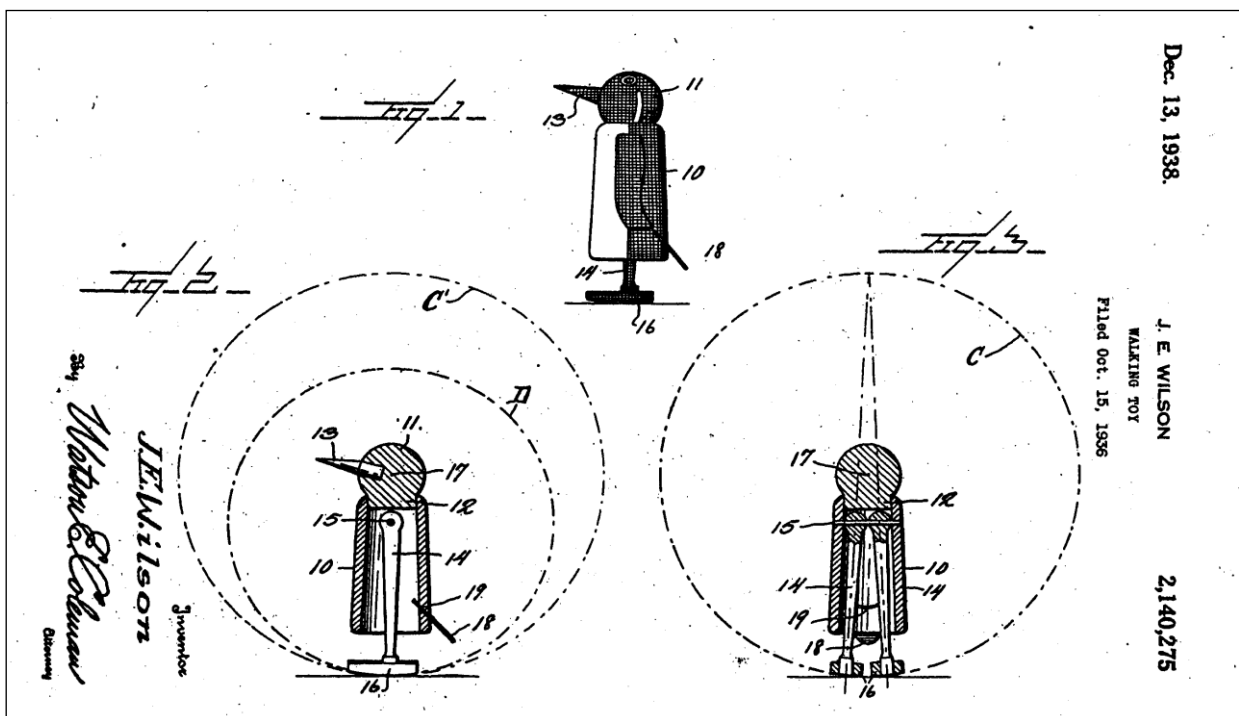
## 2.2 LOS ROBOTS BÍPEDOS

Los robots bípedos son un tipo de robot que tiene movimiento, es decir, que son móviles. Para realizar este desplazamiento utilizan dos piernas, las cuales emulan la forma de andar de los humanos, o por lo menos es la intención. Dentro de este rango de robots, se puede distinguir entre dos tipos.

### 2.2.1. ROBOTS PASIVOS:

Estos robots fueron los primeros que aparecieron en el mundo de la robótica. Son aquellos que no disponen de motores ni de ninguna alimentación energética para su funcionamiento. Su forma de desplazarse es aprovechando los desniveles y los planos inclinados, haciendo de esta manera que la gravedad sea su motor. La principal ventaja de este tipo de robots pasivos es la relación eficiencia-energía. Al no tener motores, no gastan y son altamente eficientes. Como desventaja cabe destacar que su direccionalidad es inducida, es decir, difícilmente controlable, y subir un plano inclinado, imposible.

El primero robot pasivo de la historia fue el “Wilson Walkie”. El Wilson Walkie es en realidad un juguete en forma de pingüino que camina sobre una rampa en dirección descendente. Fue patentado por John E. Wilson el 13 de diciembre de 1938. El plano que fue entregado a la oficina de patentes es el que aparece en la imagen siguiente.





**IMAGEN 2.9. Imagen del Wilson Walkie**

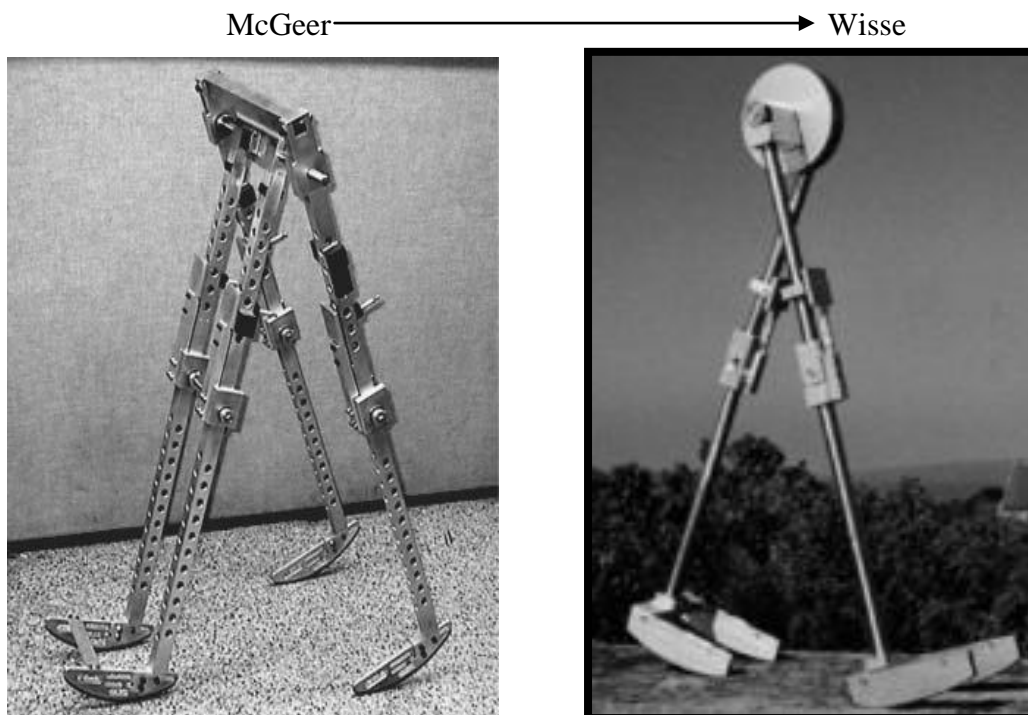
El Wilson Walkie era, como se puede apreciar en la imagen, un juguete hecho a base de madera y tela. Su funcionamiento consiste en que sus piernas giran dentro de un cono. Esta configuración de piernas dentro de un cono favorece que cuando el juguete se coloca en una rampa, puede descender a través de ella sin necesidad de ningún actuador.

Esta fue la inspiración para el ingeniero aeronáutico Tad McGeer, el cual, en la parte final de la década de los ochenta y principios de los noventa, desarrollo la base de lo que hoy conocemos como robots dinámicos pasivos. La base de sus cálculos están relacionados con estudios realizados en Harvard una década antes por un tal Tom McMahon, que según se da a entender, fue inspirado por un juguete que le regalaron de pequeño, seguramente un Wilson Walkie.

La fascinación de McGeer en sus investigaciones y en el funcionamiento de este juguete como robot pasivo, le llevo a fundar un grupo, denominado *Insitu*, donde se dedicaban a realizar naves robóticas en miniatura. Básicamente, buscaban desarrollar sistemas robóticos en los cuales no fuese necesario emplear mucha energía. Atendiendo a una cita del propio McGeer: << Las primeras pruebas las hicimos con pequeñas máquinas que bajaban por una rampa sólo con la ayuda de la gravedad. Desde ahí fuimos agregando más dinamismo y menos motores, así hemos cortado la energía utilizada >>.

Todo este interés que se ha activado con relación a los robots bípedos pasivos se debe al interés de los investigadores de extrapolar sus hallazgos para entender mejor el funcionamiento del andar humano, y con esto, ser capaces de mejorar los sistemas utilizados para ayudar a las personas con algún problema a caminar, i.e. las prótesis.

De los primero robots de estas características podemos destacar uno creado por Martin Wisse realizado en la Universidad de Cornell en el año 1998. Construyendo finalmente un andador pasivo dinámico de tres dimensiones articulado con rodillas, basados en simulaciones hechas en plano.

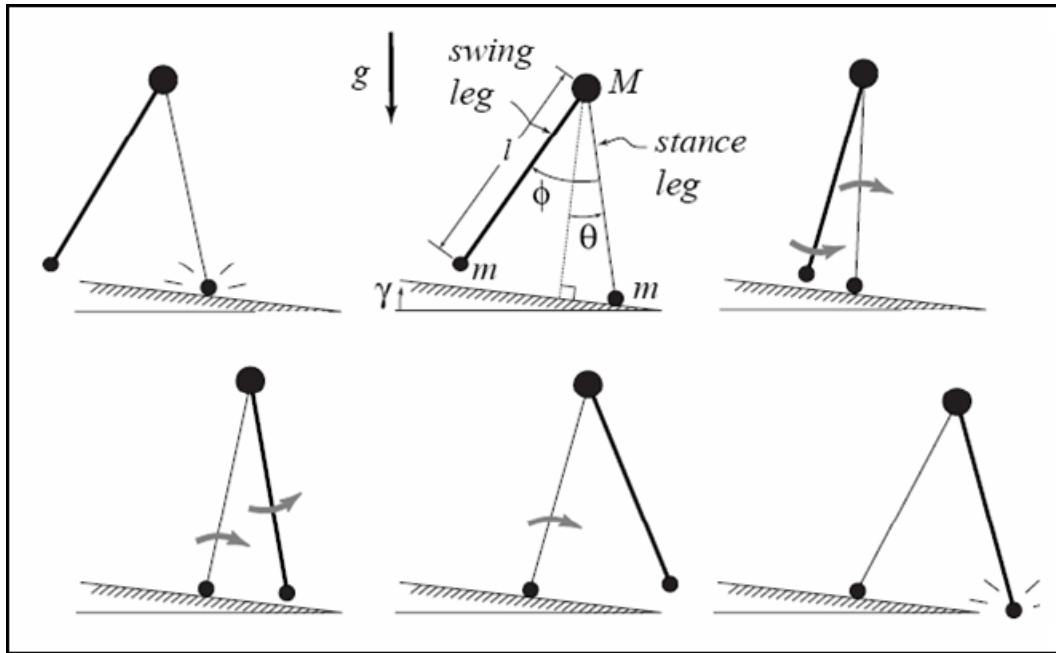


**IMAGEN 2.10. Modelos de McGeer y Wisse**

Después de alcanzar los modelos representados en la imagen superior, los avances en los robots bípedos no han sido demasiados. En realidad, no podemos destacar ningún avance hasta el año 1994. En ese año, y con excusa de la reunión que realiza la *Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS)*, se presentaron tres equipos de investigación que habían conseguido construir robots, los cuales, son muy parecidos en sus movimientos, pasos y formar de andar a los humanos.

Las tres universidades en cuestión son Delft (Holanda), MIT (EEUU) y Cornell (EEUU). Los tres modelos presentados presentan una serie de características comunes pero cada uno aporta su particularidad. Los tres robots aportan una variación con respecto a otros modelos de <<juguetes>> que caminan, y esta variación es la de balancearse. Hasta la fecha, los robots que caminaban se tenían que balancear de

manera excesiva para conseguir levantar los pies, este proceso en el caminar humano se ve reducido, en cantidad de balanceo, debido a la existencia de las rodillas. En el caso de los robots de Cornell y Delft, este proceso lo consiguen utilizar, dándole al robot un caminar mucho más natural y menos ortopédico.



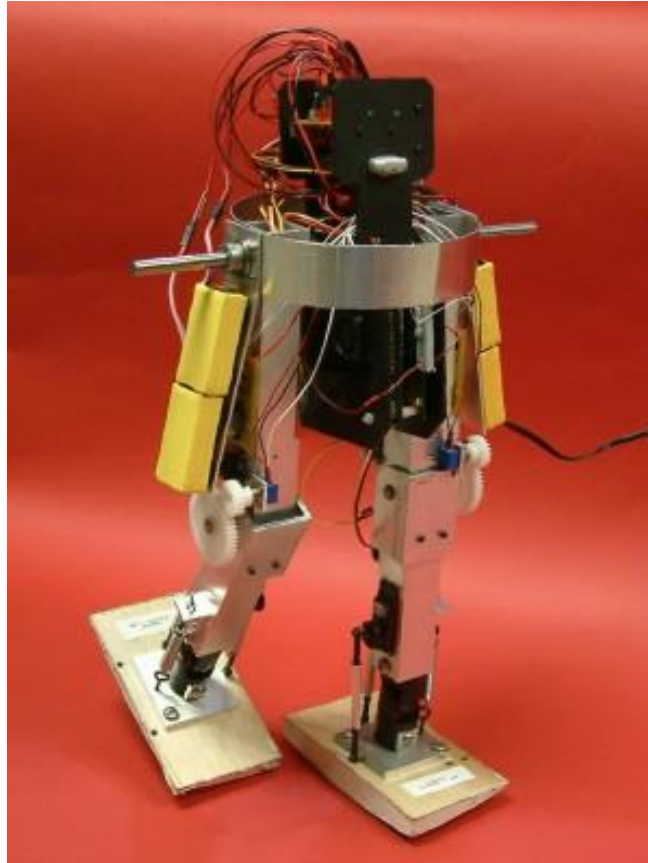
**IMAGEN 2.11. Movimiento de robot sin rodilla.**

### Toddler (MIT).

El robot Toddler es el que quizás se parece menos a la forma de andar a los humanos, pero en cambio es el más inteligente de los tres. La diferencia a la hora de andar es que no tiene rodillas que flexiona para realizar un paso, sino que únicamente se balancea para facilitar el proceso de levantar las piernas. Lo curioso está en su capacidad de aprender las cosas. En un tiempo relativamente corto, utilizando un cerebro que necesita menos energía que la que necesitaría un cerebro de hormiga, es capaz de enseñarse a caminar. Esto es, tiene un sistema de identificación del terreno y un sistema central con inteligencia artificial que le permite procesar toda la información. En un espacio de aproximadamente 20 minutos, o el equivalente a 600 pasos, el robot es capaz de enseñarse a sí mismo como caminar sobre la superficie en cuestión.

Este robot Toddler, que precisamente utiliza este nombre en relación a la franja de edad de los niños pequeños cuando empiezan a caminar, es el primer robot que puede caminar sin tener información previamente insertada en su sistema. Su sistema avanzado de aprendizaje permite que se mueva eficazmente por una serie de superficies consiguiendo un resultado aceptable incluso sobre superficies rocosas.

El objetivo del proceso de aprendizaje de Toddler es encontrar una ley de control que establezca la marcha del robot en terreno plano, usando como función objetivo el patrón de marcha que aparece al descender de forma pasiva una pendiente.



**IMAGEN 2.12.** Robot Toddler de MIT en proceso de levantar un pie.

#### **Robot Denise** (Universidad de Delft).

El robot de la universidad de Delft se llama Denise, nombre de mujer en parte debido a que su tamaño es el de una mujer de tamaño medio. A diferencia del Toddler, no tiene capacidad de aprendizaje sobre el terreno pero si tiene la capacidad de doblar sus rodillas. En el aspecto de funcionamiento, es muy parecido al robot desarrollado por Cornell, el cual detallaremos a continuación y ambos de los cuales solo pueden caminar hacia adelante.

El avance de este robot y el de Cornell se basa en su diseño mecánico, evitando así los grandes problemas de control que suelen tener los robots bípedos. Denise es un robot con características antropomórficas inspirado en la manera que un patinete o una bicicleta mantienen su estabilidad. La cadera está equipada con músculos McKibben, unos actuadores neumáticos que pretenden reproducir los músculos humanos. Así, mediante un diseño adecuado de la articulación del tobillo se acopla la inclinación

lateral del robot con el giro respecto a su eje vertical, lográndose una estabilidad lateral suficiente como para que Denise ande. Para ello, la articulación del tobillo permite el giro en la dirección de la marcha. El parámetro crítico que determina la estabilidad de Denise es el ángulo que forman el pie y la pierna en el plano sagital, que está también relacionado con la velocidad mínima a la que tiene que caminar para no caerse.

Según comenta los investigadores de la Universidad de Delft << Un menor número de movimientos motorizados es el secreto para la eficiencia energética. Si no están bien diseñados, los motores absorben energía. Para reducir esta energía hay que reducir el trabajo que realizan los motores>> [7].



**IMAGEN 2.13.** Imagen del robot Denise, del tamaño de una mujer media.

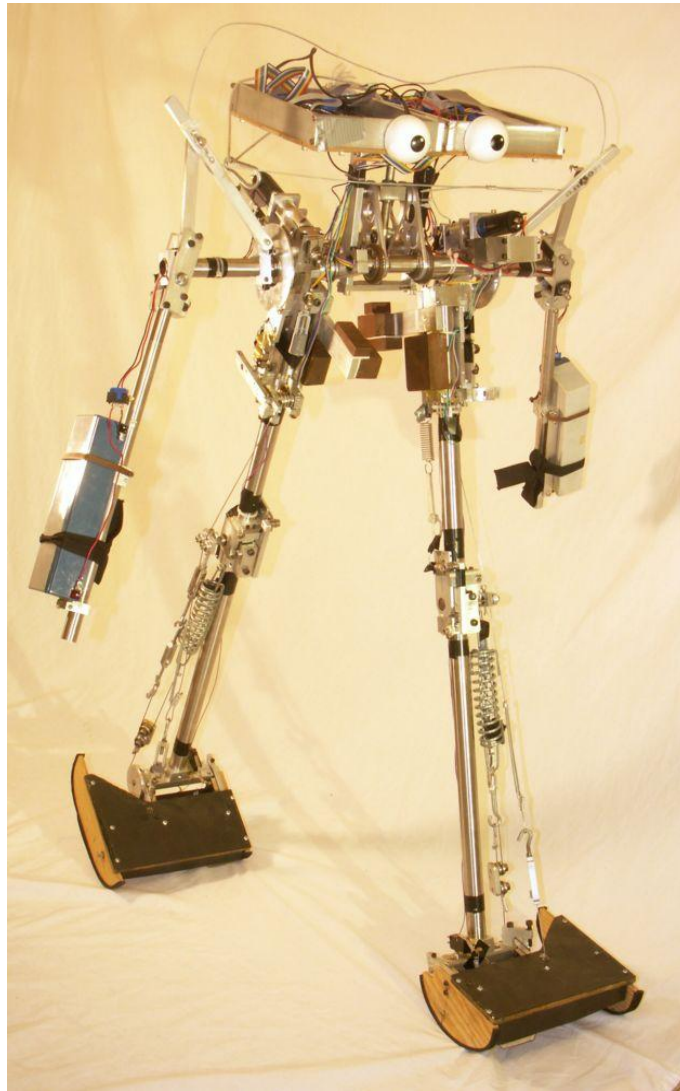
---

### **ROBOT RANGER** (Cornell University)

El robot bípedo llamado Ranger de la Universidad de Cornell mide un metro, tiene dos patas largas con articulaciones (caderas, rodillas y tobillos) dos brazos, una barra corta en lugar de torso y una caja plana por cabeza, donde va un pequeño microcontrolador y un par de baterías a cada lado. El funcionamiento de este robot es de tal éxito debido a que explota eficazmente el equilibrio y la dinámica del balanceo natural, de manera que precisa muy poca energía para desplazarse. De hecho, fue diseñado para consumir energía únicamente en el proceso de levantar el pie, siendo la gravedad la que lleva el pie al contacto con el suelo nuevamente.

Una vez conseguido el simular la manera de caminar de los humanos, los robots buscan minimizar la energía. El sistema explicado anteriormente mezclando el aporte de energía con la gravedad es un gran ejemplo. De hecho, este robot de la Universidad de Cornell es la única máquina andante (no pasiva) que consume menos energía al andar que el hombre: su Coste de Transporte (COT) definido como la energía consumida para mover una unidad de peso una unidad de distancia, es de 0.2, frente al 0.3 del ser humano o el 3.2 de ASIMO. Este avance es enorme ya que los robots más avanzados necesitan hasta decenas de motores para conseguir andar, y por tanto, un consumo mucho mayor.





**IMAGEN 2.14. Robot Ranger.**

### **2.2.2. ROBOTS ACTIVOS**

Por robot activo se entiende aquel que para generar movimiento necesita la actuación de una fuerza externa, tal como un motor. Los robots activos han ido evolucionando a lo largo de la historia, igual que los pasivos, desde el modelo inicial, que constaba de un único actuador, hasta los modelos que se encuentran actualmente funcionando, que constan de decenas de motores. Cada motor conlleva su propio sistema de control y un aumento de grados de libertad del sistema. Cada vez que se le añade un grado de libertad al sistema se le está añadiendo peso.

En lo referente a la robótica activa de bípedos, las investigaciones han tenido mayores proliferaciones. Estas proliferaciones se deben a que muchas empresas de



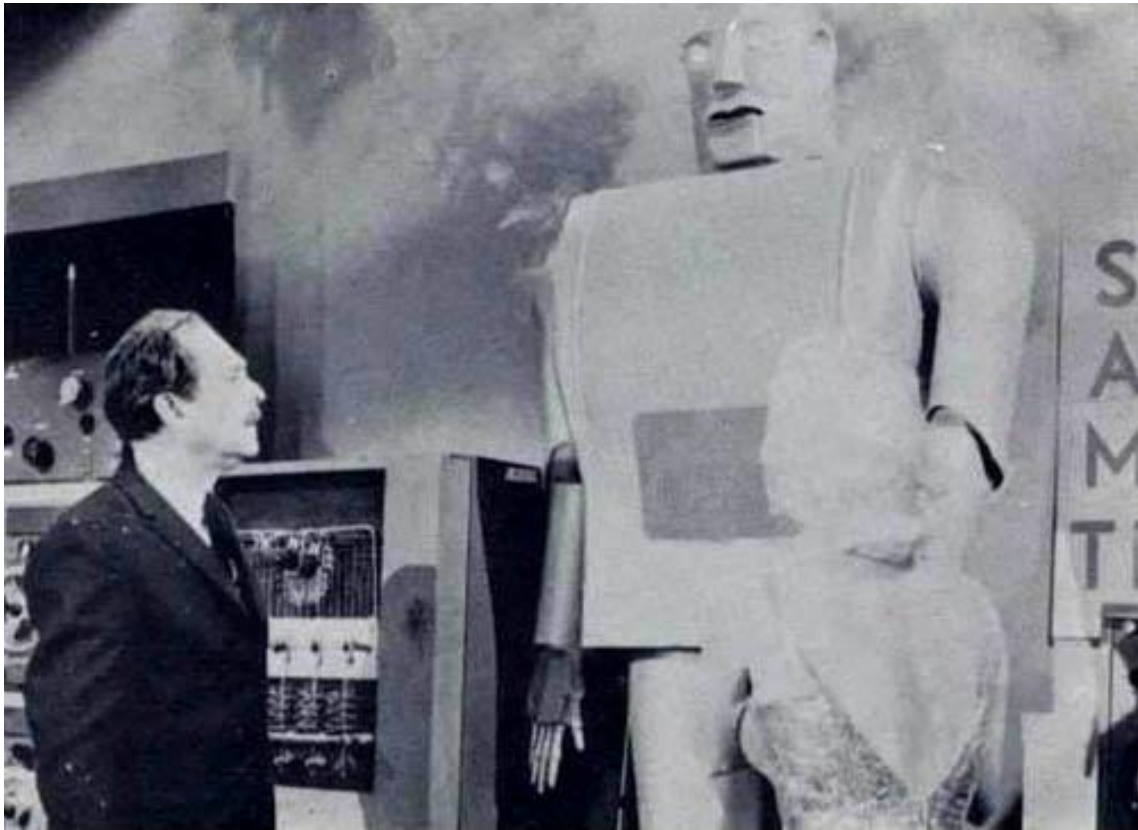
capital privado han visto en el desarrollo de estos robots un valor seguro para el futuro. Tal es el caso que empresas líderes como Honda o Toyota destinan millones de dólares cada año para profundizar más en su desarrollo.

Estos robots activos son denominados también humanoides, actualmente, los que se desarrollan tienen un gran número de actuadores. Estos actuadores son fundamentales para poder controlar el gran número de grados de libertad del que consta el sistema. Todos estos robots se controlan de manera similar a los manipuladores industriales, se basan en el control de trayectorias. La marcha se sintetiza como una trayectoria continua a lo largo del espacio, que el robot debe seguir manteniendo su estabilidad local. Durante años se ha satisfecho esta restricción usando el paradigma del “Punto de Momento Cero (“Zero Moment Point”, ZMP) propuesto por Vukobratovic [12]. **El ZMP se define como el punto del suelo respecto al cual el momento creado por las fuerzas inerciales y gravitacionales no tiene componente en los ejes horizontales.** Para garantizar la estabilidad, el ZMP debe mantenerse en el polígono de sustentación, la superficie que definen los pies en contacto con el suelo. En definitiva, fue el primer sistema útil propuesto para explicar la locomoción bípeda.

Existen otro tipo de criterios de estabilidad tal como el <<Indicador de la Rotación del Pie>> (“Foot Rotation Indicator”, FRI), aunque menos utilizados. Sea cual sea el criterio de estabilidad utilizado, una vez que este criterio esté garantizado, el robot será capaz de caminar de forma segura [8].

Durante los años, la evolución de los humanoides, aunque siguiendo técnicas parecidas, ha ido variando según la institución o empresa que ha desarrollado las tecnologías y que las ha ido implantando de manera eficaz. Si hiciésemos un resumen exhaustivo de todos los desarrollos de robots humanoides en los últimos años sería demasiado largo, por tanto, mencionaremos unos de los más destacados a modo informativo de sus funciones y avances.

**ELEKTRO 1939:** Es el nombre por el cual se conoce a el robot construido por la Westinghouse Electric Corporation entre los años 1937 y 1938. Aparece oficialmente en la Feria Mundial de Nueva York de 1939. Estaba construido de acero con un esqueleto de motor cubierto por <<piel>> de aluminio. Media siete pies de altura y pesaba 265 libras. En apariencia era humanoide, pudiendo caminar por comandos de voz. Su capacidad de habla se la proporcionaba una gramola de 78 rpm, la cual le proporcionaba una amplitud de 700 palabras, también fumaba cigarrillos e inflaba globos. Todas estas cualidades eran bastante espectaculares para un robot que además movía los brazos y la cabeza. Este es quizás el primer robot que se desarrolla fuera de las máquinas herramientas, es decir, un robot que no es para la industria sino meramente para la diversión de los humanos.

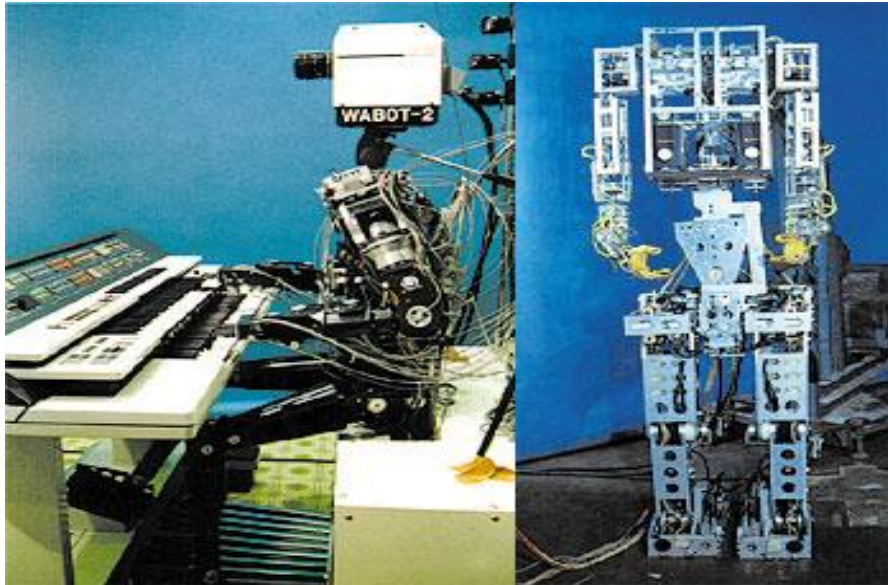


**IMAGEN 2.15.** *Elektro, en comparación con un hombre de tamaño medio.*

**WABOT-1** (1973): con el fin de desarrollar este proyecto, se unieron cuatro laboratorios de la misma universidad, creando un <<Grupo de Bio-Ingeniería>>. Wabot es el nombre determinado por la conjunción del nombre de la universidad, Universidad de Waseda, y la palabra robot, WABOT. Este robot, fue el primer robot antropomorfo a escala desarrollado en el mundo. Consistía en un sistema de control de extremidades, un sistema de visión y un sistema de conversación. El Wabot-1 fue capaz de comunicarse con una persona en japonés, medir distancias y direcciones de objetos usando receptores externos, oídos y ojos artificiales, y una boca artificial. Caminó con sus miembros inferiores y fue capaz de agarrar y transportar objetos con las manos usando sensores táctiles. Se estimaba que el Wabot-1 tenía la facultad de un niño de un año y medio.

Con los años, este primer robot, revolucionario en su tiempo, se fue evolucionando y a los siete años de lanzar el Wabot-1 se lanzó el Wabot-2. En el año 1980 los laboratorios que participaron en el proyecto WABOT1 se volvieron a unir de nuevo para iniciar el proyecto WABOT-2. Tocar el piano requiere el uso de una función inteligente que el robot WABOT-2 era capaz de realizar, así como las actividades artísticas, tocar el piano requeriría habilidades humanas como la inteligencia y la destreza. Por lo tanto el WABOT-2 se define como un <<robot especialista>>, en lugar de un robot versátil como lo fue el WABOT-1. El robot músico WABOT-2 puede

conversar con una persona, leer una partitura musical normal con los ojos y jugar con un juego de melodías de dificultad media en un órgano electrónico. También es capaz de acompañar a una persona mientras la escucha cantar. El WABOT-2 fue el primer hito en el desarrollo de un <<robot personal>>.



*IMAGEN 2.16. El Wabot-2 con su antecesor el Wabot-1.*

**HUMANOIDES HONDA:** En 1986 Honda hace su primer esfuerzo por crear un humanoide. El predecesor de las maravillas que existen hoy en día se llama E0. Este robot era capaz de andar en línea recta, con una pierna detrás de la otra, pero con 5 segundos de intervalo entre pasos. Los sucesivos E1, E2 y E3 consiguieron andar mas rápido. El E2 fue el primero con movimiento dinámico con cierta autonomía entre piernas. En 1991 se cerró el desarrollo de la primera fase, habiendo conseguido éxitos como caminar a una velocidad más o menos constante y que se simulara el andar humano. Además de esto, la nueva tecnología fue incorporada para conseguir que los robots pudieran controlar el balanceo de su cuerpo y tuvieran la habilidad de avanzar sobre pisos en los que hubiese obstáculos simples.

El E4 conseguía andar a la velocidad que un humano anda de manera rápida. El hermano mayor, el E5 fue el primer robot autónomo de su tipo y predecesor del mayor logro hasta el momento, el E6. Este último fue el primero en conseguir controlar sus propios balanceos. Esto le permitía subir y bajar escaleras, salvar obstáculos o subir rampas. Conseguido el movimiento de piernas Honda se embarcó en una nueva aventura, incluirle un tronco y brazos que se pudieran mover, dándole el semblante lo más parecido a un humano.

El P3 fue el primer robot humanoide bípodo, imitador de la forma de andar humana, completamente independiente. Fue finalizado en 1997. La altura y peso del P3 se redujeron considerablemente gracias al cambio de los materiales empleados así como el hecho de descentralizar el sistema de control. Su pequeño tamaño lo hace mejor adaptado a los entornos de trabajo humanos. El P3 fue el que permitió a Honda introducir la estética ASIMO, atractivo para millones de personas tanto funcional como estéticamente.

En el año 2000 Honda presentó la primera versión del popular ASIMO, un robot que medía sólo 1,2 m de altura y había rebajado su peso hasta los 52 Kg. Era capaz de caminar a 1,6 Km/h, podía permanecer en funcionamiento durante 30 minutos seguidos y sus baterías necesitaban de 4 horas para recargarse por completo.

El nombre ASIMO proviene de Advanced Step in Innovative MObility, es pronunciado <<ashimo>> en japonés y significa <<piernas también>>. Este menudo robot es el resultado de catorce años de investigación por parte de Honda en la mecánica de la locomoción bípeda. Cerca de 40 de los 2000 modelos que existen del ASIMO están dando la vuelta al mundo mostrando su potencial en actos promocionales.

En el año 2005 Honda presentó un nuevo ASIMO. Con el mismo tamaño que el prototipo del 2004, pero capaz de caminar a 2,7 Km/h (1,6 Km/h en caso de llevar un objeto de 1 Kg) y correr a 6 Km/h en línea recta y 5 Km/h en círculos. Se crea para aplicaciones profesionales tales como repartir café, entregar mensajes, empujar carritos, etc. Esto ha hecho que Honda empiece a <<contratar>> ASIMOs como recepcionistas en sus oficinas principales, para después comenzar a alquilarlos a otras empresas por aproximadamente 200.000€ al año. En el año 2007 se consiguió que trabajara en equipo con otros robots como él y que pueda moverse cómodamente entre personas.

Para permitir a ASIMO funcionar en un entorno de oficina, Honda ha desarrollado una tarjeta de telecomunicación. Esta tarjeta almacena y comunica inalámbricamente información del personal, así ASIMO puede reconocer unívocamente a sus compañeros de trabajo, además de aplicar otros reconocimientos faciales o por voz para confirmar su identidad. El hecho de que ASIMO detecte la fuerza ejercida sobre sus brazos le permite aplicar presión en los carros mientras los equilibra, o coger las manos de una persona y permitir que ésta le guíe en su movimiento. Queda claro que se ha evolucionado a tal nivel que es una herramienta para facilitar el trabajo humano y no un simple juguete.



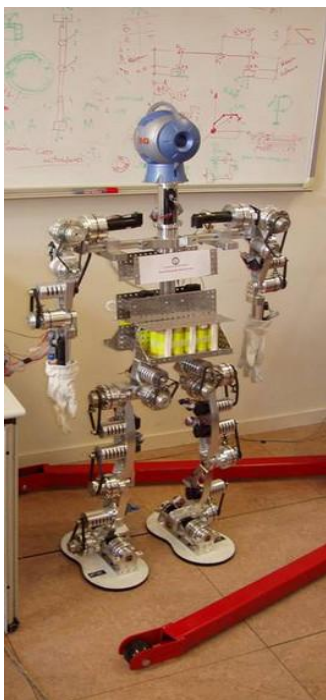
**IMAGEN 2.17. La evolución de Honda.**

Vistos los primeros diseños de humanoides y la evolución temporal de Honda, quizás la empresa más avanzada en el desarrollo de robots con forma humana que faciliten nuestras tareas, no está de más mencionar los desarrollos que se están realizando dentro del departamento de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid. Hasta la fecha han desarrollado dos prototipos, el *Rh-0* en el año 2004 y el *Rh-1* en el 2007. Ambos han sido desarrollados bajo la financiación de la CICYT (Centro de Investigación Científica y Tecnológica) y dirigidos ambos proyectos por el profesor Carlos Balaguer. Las siglas Rh significan Robot Humanoide, y en ambos casos, el funcionamiento de los robots es muy parecido. La gran diferencia apreciable es la incorporación de una carcasa protectora en el modelo Rh-1.

Las características comunes a ambos modelos son:

- Tamaño natural: 1,5 m.
- Peso: 50 kg incluidas baterías.
- Dispone de 21 grados de libertad: 6 GDL en cada pierna. 3 GDL en cada brazo. 1 GDL en la cabeza.
- 2 ordenadores a bordo.
- Sensores a bordo: 2 Fuerza/Par en los brazos; 3 inclinómetros y 3 acelerómetros.
- Conexión wi-fi.





**IMAGEN 2.18. Robot Rh-0 y Rh-1 de la UC3M.**

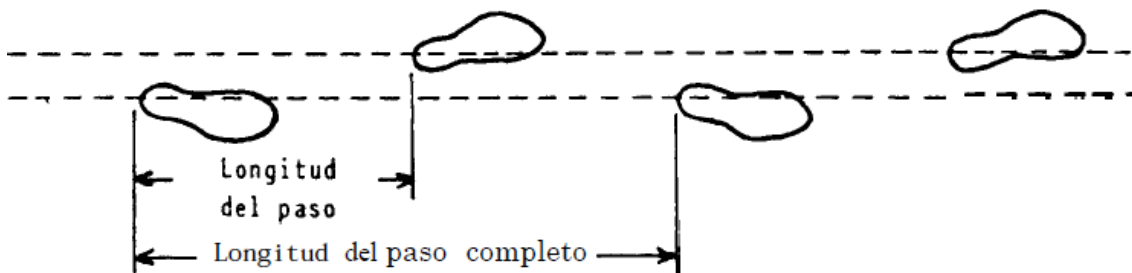
### **2.3 TEORÍA DEL MOVIMIENTO BÍPEDO**

Para la creación de un robot, aparte de las cuestiones técnicas, son necesarias unas nociones extendidas del modo de actuar del ser humano. La manera de moverse, los esfuerzos realizados, las trayectorias en cuestión, el porqué de ciertas reacciones basadas en movimientos musculares sin relación aparente, etc. Para todo esto es necesario apoyarse en documentos de investigación de otros científicos que han buscado el porqué de todo en el funcionamiento humano. Para este proyecto, considerando que se trata de un robot bípedo con un único grado de libertad y sin articulaciones, nos centraremos en desarrollar los elementos relacionados con la marcha bípeda. Empezaremos detallando lo que hace posible la marcha bípeda en los seres humanos, animal bípedo por excelencia y al cual podemos estudiar de manera exhaustiva, y luego, los estudios y avances de otros investigadores del ámbito de la robótica, los cuales nos permitirán avanzar sin tener que experimentar [13].

#### **LA LOCOMOCIÓN HUMANA**

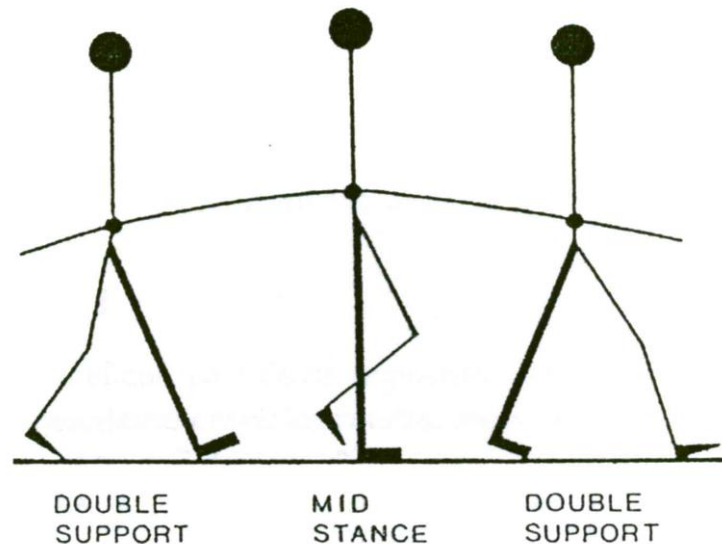
El conocimiento de la locomoción humana normal es la base del tratamiento sistemático y del manejo del a marcha patológica, especialmente cuando el elemento es una prótesis o sistema de accionamiento mecánico. La locomoción humana está definida como una serie de movimientos alternantes, rítmicos, de las extremidades y del tronco, que determinan un desplazamiento hacia adelante del centro de gravedad. Dicha inclinación del centro de gravedad hacia adelante es lo que permite que se pueda avanzar en el proceso de caminar. Si no fuese por este balanceo en la dirección del movimiento, el proceso sería mucho más exigente y energéticamente ineficaz.

El ciclo de la marcha se inicia cuando un pie que entra en contacto con el suelo, se desplaza y vuelve a apoyarse sobre el suelo en una posición distinta. Es decir, el pie de apoyo, cuando se convierte en el pie desplazado y vuelve a apoyarse, esto se llama paso (gait en inglés). Dentro del paso podemos destacar las dos fases más importantes, que son: fase de apoyo y fase de balanceo.



**IMAGEN 2.19. Esquema de un paso humano.**

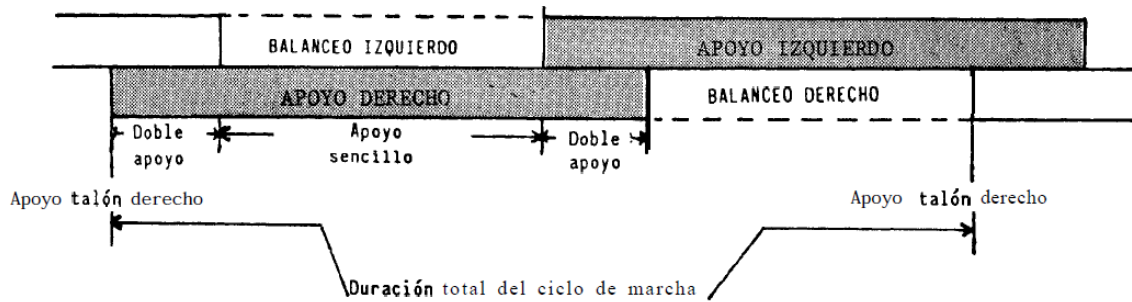
Para que una pierna esté en fase de apoyo, esta ha de estar en contacto con el suelo. Mientras esto ocurre, la otra pierna puede estar también apoyada, momento denominado de doble apoyo, o en proceso de la marcha, es decir, en el balanceo. El proceso de balanceo es aquel que se conoce por cambiar de posición uno de los pies mientras el otro sirve de sustento. Entraremos más en detalle de estos elementos relacionados con el paso.



**IMAGEN 2.20. Representación de las fases de apoyo en un paso.**

- Apoyo sencillo: sólo una pierna está apoyada en el suelo.
- Balanceo: proceso de desplazar la pierna.
- Apoyo doble: ambos pies están en contacto con el suelo por un pequeño periodo de tiempo.
  - La ausencia de un doble apoyo es lo que distingue la marcha entre andar y correr. Para un robot bípodo, sin el doble apoyo garantizar el equilibrio y la estabilidad del mismo se complica demasiado (por ahora).



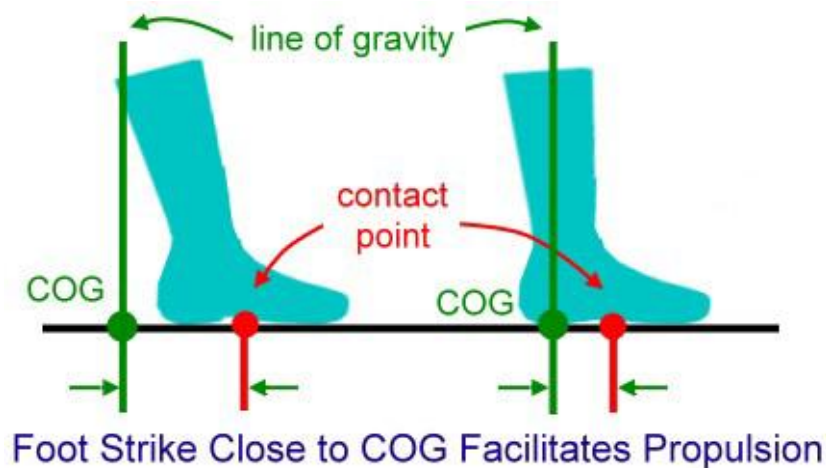


**IMAGEN 2.21. Esquema del tiempo de permanencia en cada apoyo durante un paso.**

En un ciclo normal de la marcha, con velocidad más o menos constante, la fase de apoyo ocupa el 60% del ciclo y la fase de balanceo el 40%. Dentro del periodo de apoyo, el 20% del tiempo estamos en la situación de apoyo doble.

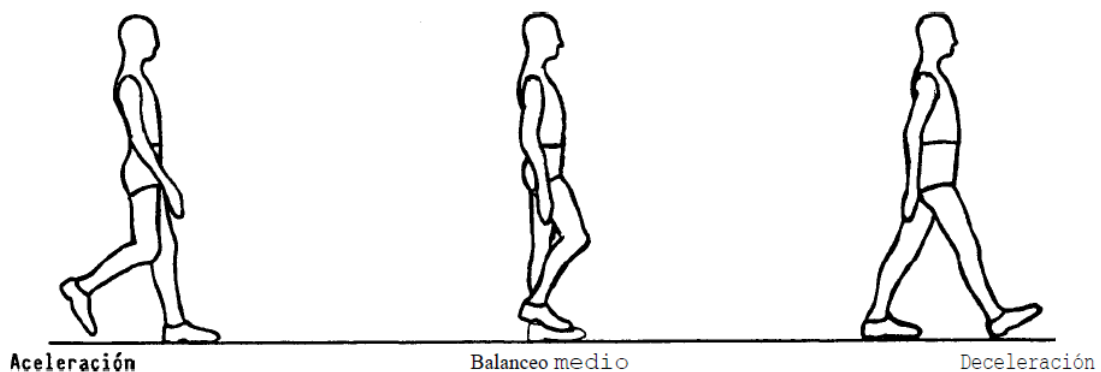
Con el aumento de la marcha, la fase de balanceo se ve incrementada a la vez que la fase de apoyo doble se ve reducida. Al hacer un análisis en un sistema bípodo, estas modificaciones, ya sea por cambio en la inclinación del terreno para robots pasivos, o por un incremento de la velocidad de giro para robots mecánicamente accionados, se ve claramente representado por el aumento de la cantidad de pasos en un tiempo/espacio determinado y de la duración en las gráficas comparativas de los llanos del plano vertical al tener los pies apoyados.

En la marcha de los humanos existe un elemento claramente diferenciador con nuestro robot. En una primera fase de apoyo, el contacto inicial lo hace una parte del pie, el talón, no todo en conjunto. Esto se debe a que los humanos tenemos tobillos que se pueden doblar y accionar de muchas maneras, en cambio, nuestro robot, tiene un apoyo plano, no tiene juego en las juntas del pie y el apoyo es total y homogéneo (o por lo menos debiera serlo). Para el análisis del movimiento bípodo, en vez de atender las cinco fases que tiene el humano, incluyendo los tobillos y apoyo de talón y de punta, nos centraremos en las tres importantes, las encargadas de distribuir pesos y esfuerzos en el apoyo.



**IMAGEN 2.22. Esquema del punto de contacto y el CDM del pie.**

La distinción para la fase de apoyo es la siguiente: aceptación del peso, apoyo medio y despegue. El proceso de aceptación del paso es el del apoyo del talón y acaba con el apoyo plantar, en el Pasibot, es todo a la vez y es una única fase de apoyo simultáneo. El intervalo de apoyo medio hace referencia al momento en que está apoyada la parte central del pie y se va a proceder a levantarlo. Y la última, en el momento de levantar el pie, por eso se llama despegue, porque se despega del suelo.



**IMAGEN 2.23. Esquema de la marcha bípeda de un humano.**

Vamos a centrarnos algo más en la fase del balanceo. Dentro del balanceo podemos hacer tres nuevas subdivisiones: aceleración, balanceo medio y deceleración. En la parte de análisis de este proyecto, estas distinciones en la fase del balanceo deben verse representadas en las gráficas de aceleraciones. Cada una de estas tres fases ocupa aproximadamente un tercio del proceso de balanceo.

En el primer tercio, el tercio de la aceleración, se caracteriza por el aumento casi instantáneo de la velocidad a partir del momento en el que el pie despegar. Este aumento en la aceleración es lo que hace vencer las resistencias de los elementos para poder permitir así una elevación y un posterior desplazamiento en la trayectoria.

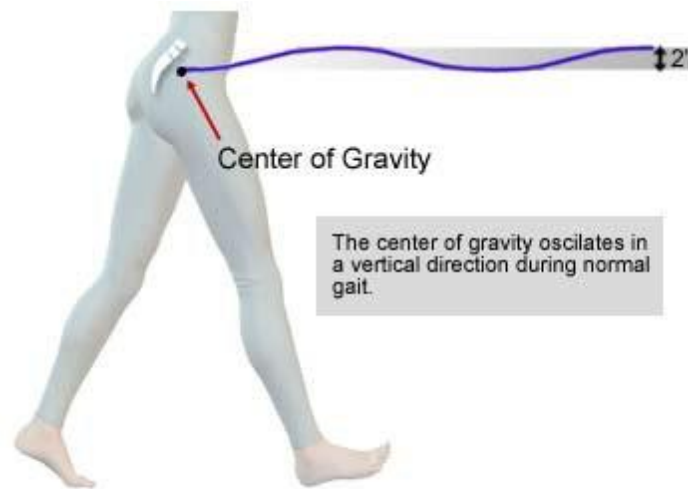
El tercio medio, el que hace referencia al balanceo medio, la pierna que ha despegado, se desplaza de manera positiva en su trayectoria estipulada consiguiendo adelantar así a la otra pierna, la cual está cumpliendo la función de apoyo para permitir la marcha. Este momento es en el cual tenemos la pierna totalmente en volandas desplazándose por el aire.

La última fase está caracterizada por la deceleración, es decir, una aceleración en sentido opuesto a la dirección de aceleración del tercio inicial. La pierna, la cual se ha acelerado y luego desplazado en el balanceo medio, ha de volver a contactar con el suelo para entrar en la fase de apoyo y permitir así que la otra pierna se desplaza de la misma manera. Esta deceleración se caracteriza por un movimiento rápido muy cercano a la zona de apoyo.

### **2.3.1. Movimiento del CDM**

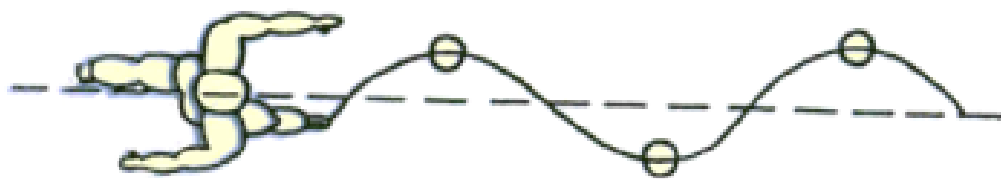
Si nos atenemos a las leyes que rigen el funcionamiento de las cosas, las leyes de la mecánica, podemos deducir que el mínimo gasto de energía se alcanza cuando un cuerpo sigue una línea recta sin desviación del centro de gravedad del mismo. Esta nulidad en cuanto al desplazamiento del centro de gravedad hace referencia tanto al plano vertical como al plano horizontal. Si queremos un robot lo más eficiente en su marcha, estos desplazamientos, los cuales por desgracia no pueden anularse, han de ser mínimos. Esto es uno de los elementos de mayor estudio en la marcha bípeda, la optimización del desplazamiento del centro de gravedad de un bípedo.

En cuanto al movimiento del plano vertical, el centro de gravedad se mueve de manera casi rítmica según se mueve hacia adelante. El punto más alto es alcanzado cuando la extremidad que está cargada, la que se encuentra en fase de apoyo, se encuentra en el centro de dicha fase. El punto más bajo alcanzado es el de apoyo doble, cuando ambos pies contactan con el suelo. En un adulto de sexo masculino, la desviación estándar en vertical del centro de gravedad es de unos 5cm. De todos modos, esta desviación es muy suave y sin cambios bruscos como se puede apreciar en la siguiente imagen.



**IMAGEN 2.24. Esquema del desplazamiento vertical del CDM en la marcha.**

En el caso del desplazamiento lateral, cuando el peso es trasladado de un apoyo al otro, existe una desviación en la pelvis, en el caso de nuestro robot en la cadera, hacia el lado en el que se está apoyando el peso del cuerpo. En el proceso de desplazarse hacia adelante, está sufriendo el movimiento rítmico en la vertical y también en la horizontal. Al igual que en el caso del desplazamiento vertical del centro de gravedad, en un adulto normal, oscila en torno a los 5cm.



**IMAGEN 2.25. Esquema del desplazamiento lateral del CDM en la marcha.**

Por último, destacaremos el último elemento imprescindible de entender para comprender correctamente la marcha bípeda, el funcionamiento de la rodilla. Es obvio que la rodilla está compuesta por multitud de elementos, en lo que se refiere a tendones

y músculos. En el Pasibot, es simplemente una barra que permite la unión y flexión entre el fémur y la tibia. Esta función de unión no es la única que tiene la rodilla. En el proceso de la marcha, la flexión de la rodilla se inicia en el momento en el que el pie se apoya y continúa hasta conseguir el apoyo total. Esta característica es la que permite suavizar la línea que recorre el centro de gravedad y reduce los desplazamientos verticales del mismo.

### **2.3.2. TIPOS DE MARCHA SEGÚN LOS ROBOTS.**

Centrándonos en el estudio del movimiento bípedo exclusivamente en los robots, tenemos que hacer unas pequeñas distinciones para saber que rama de la ciencia lo va a estudiar.

- MECÁNICA: ciencia que estudia los movimientos de los objetos materiales.
  - ESTÁTICA: se encarga de los elementos inerciales.
  - DINÁMICA: se encarga de los elementos no inerciales.
    - CINÉTICA: fuerzas que generan, cambian o detienen el movimiento.
    - CINEMÁTICA: descripción geométrica del movimiento en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración.

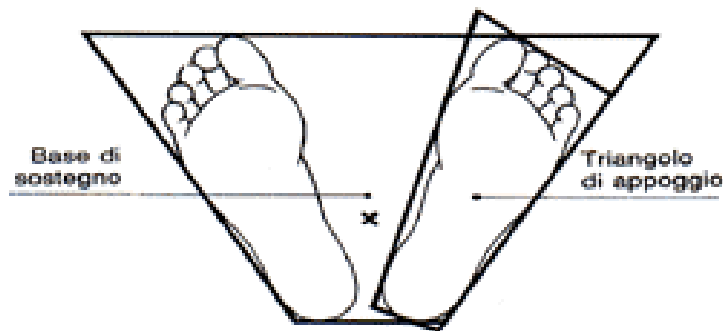
En el desarrollo de este proyecto de fin de carrera, nos centraremos más en la medición y el análisis de las cuestiones cinemáticas.

“La marcha normal bípeda es alcanzada mediante una combinación compleja de componentes posturales automáticos y voluntarios que requiere la estabilidad que proporcione soporte anti gravitatorio del peso corporal, movilidad de los segmentos corporales y el control motor a la secuencia de múltiples segmentos mientras transfiere el peso del cuerpo de una extremidad a otra resultando en una progresión eficiente”.

En la robótica, a imitación de lo antes visto de la marcha humana, se busca alcanzar la estabilidad en la posición vertical, un mantenimiento en la progresión y conservación de la energía. Este último aspecto es el que diferencia a los robots pasivos de los activos. Los robots activos, explicado en la introducción histórica de la robótica al principio del documento, buscan tener mayor cantidad de funciones. A cada función, y por tanto, grado de libertad, se le aplica un motor, un mayor peso y un mayor consumo energético. En cambio, los robots pasivos, lo que buscan es tener un consumo menor, y por medio de distintos mecanismos, conseguir una marcha lo más parecida a la humana. Los pasivos tienen algún actuador para alargar o acortar la marcha o para

permitir su desplazamiento, pero, en definitiva, lo que buscan es simplificar la robótica que tanto ha avanzado y se ha complicado. Por esta razón surge este proyecto, la búsqueda de un robot lo más sencillo posible, 1 grado de libertad, y que consiga caminar de la manera más similar a la marcha bípeda humana.

Dentro de las líneas de actuación de las investigaciones en este campo, la simplicidad de los robots pasivos busca que se controlen por medio de trayectorias. La marcha se sintetiza como un trayectoria continua a lo largo del espacio, la cual, el robot debe seguir manteniendo su estabilidad local. Durante años se ha satisfecho esta restricción usando el paradigma del “Punto de Momento Cero”. El ZMP (según sus siglas en inglés “Zero Moment Point”) se define como el punto del suelo respecto al cual el momento creado por las fuerzas inerciales y gravitacionales no tiene componente en los ejes horizontales. Para garantizar la estabilidad, el ZMP debe mantenerse en el polígono de sustentación, la superficie que definen los pies en contacto con el suelo.



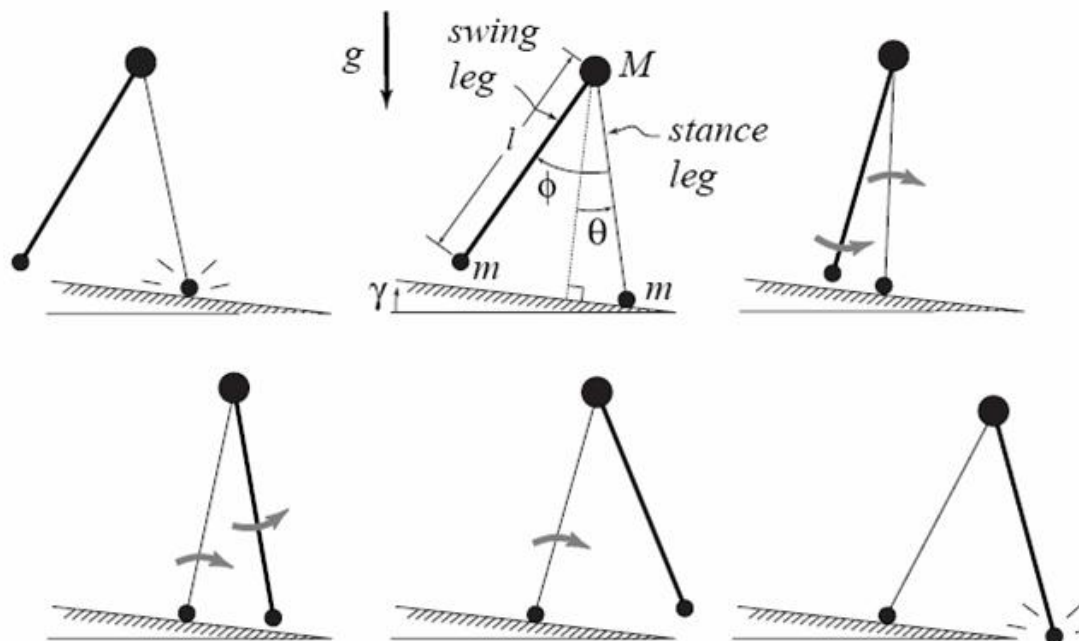
**IMAGEN 2.26. Polígono de sustentación.**

Existen otros métodos de equilibrio para los robots aunque menos extendidos y utilizados. No obstante, ya sea el ZMP o el FRI (Foot Rotation Indicator), una vez que el robot consiga la estabilidad, es capaz de caminar de forma segura. Gracias a estos conceptos, los robots humanoides han conseguido una gran cantidad de hazañas complicadas como bajar y subir escalones, rodear obstáculos o manipular elementos.

La razón por la que se le dedica tanto estudio aún al caminar bípedo aplicado a los robots, es porque aún no se ha conseguido que un robot camine de manera estable en una superficie irregular. En otras palabras, enviar un robot a caminar por la montaña no es lo más lógico a fecha de hoy, y se trabaja para que en el futuro, de manera independiente al terreno que sea, se pueda adaptar a la superficie.

Ateniéndonos a los avances en esta rama, los primeros “Robots Pasivos Dinámicos” fueron desarrollados por McGeer, como se ha mencionado antes en la introducción histórica. Sus características eran muy distintas a los robots humanoides tradicionales. Su particularidad yacía en lo curvo de sus pies, esta curvatura, la cual hacía no que se pudiesen controlar, eran capaces de caminar de forma visualmente mucho más parecida a la de los humanos, mucho más que la de cualquier robot tradicional. Estas máquinas iniciales eran 100% pasivas, es decir, solo descendían rampas. A fecha de hoy, algunas ya tienen hasta torso, y además, se les han incluido actuadores para poder caminar sobre terreno plano, o incluso, como en el caso de las investigaciones del pasibot, para modificar la zancada en un momento dado.

La línea actual de investigación se ha decantado por una “forma constructiva” de similar la manera compleja de andar de los humanos. Los robots pasivos antes mencionados son los denominados “Robots de Ciclo Límite” debido a que nominalmente se basan en la marcha cíclica. Partiendo de la base, vemos en la siguiente imagen lo simple que fue el antes mencionado prototipo de McGeer, hasta tal punto que se le denominó “The Simplest Walker”.



**IMAGEN 2.27. Movimiento de robot sin rodilla.**

En la imagen se aprecia el balanceo creado por esta primera prueba de caminar pasivo. Se puede apreciar que la pierna más gruesa es la que representa el segmento en oscilación. Una vez la pierna fina comienza su fase de apoyo, esta se comporta como un péndulo invertido. Al final de la fase de oscilación la pierna en balanceo golpea el

suelo, disipando energía. La energía potencial que disipa la rampa es quien se encarga de compensar la pérdida de energía, haciendo posible que el modelo, al igual que todos los “passive dynamic walkers”, camine.

El requisito fundamental para que la marcha sea cíclicamente estable es que las condiciones iniciales en dos zancadas consecutivas sean lo suficientemente iguales. Si la marcha es perfectamente cíclica, las condiciones iniciales y finales serán exactamente iguales. Una vez que el bípodo alcanza su Ciclo Límite, lo sigue de manera perenne, es decir, si no actúa sobre el mismo una fuerza externa, el bípodo será estable.

Para concluir con la teoría del movimiento acabaremos con una pequeña definición de “Limit Cycle Walking”, la cual se define como, ***“una secuencia nominalmente periódica de pasos, que es estable como un todo pero no localmente estable en cada instante de tiempo”***. Esto nos quiere decir que lo importante no es que todos los pasos sean estables sino que el resultado final lo sea. Esta definición se acepta porque permite que el balanceo y los pasos posteriores absorban cualquier error que pudo haber. Por tanto, aunque cada paso debería ser una reproducción exacta del anterior, traduciéndose en una curva cerrada en el espacio de estado, lo que se busca en la realidad es que el robot se mantenga lo más cercano a esa curva. El hecho de que no tengan que ser exactos los pasos evita que los robots tengan que tener uno complicados lazos de realimentación, consiguiendo así, una marcha aceptable generalmente.



## **CAPÍTULO III: El robot Pasibot.**



## **CAPITULO III: EL ROBOT PASIBOT**

### **3.1. DESCRIPCIÓN DEL PASIBOT**

El robot Pasibot fue ideado, diseñado y fabricado por los miembros del laboratorio MAQLAB de la Universidad Carlos III de Madrid en el año 2007. Este robot bípodo es el centro de estudio de este proyecto de fin de carrera. Es un robot bípodo activo que busca unir dos aspectos normalmente contrariados, lo simple con lo complejo. La simplicidad que se buscaba viene reflejada en el movimiento generado por un único motor, el cual, mediante una serie de mecanismos reductores y de transmisión de potencia consigue transmitir el movimiento a todo un robot bípodo, en fin, un robot con un grado de libertad es definitivamente lo más simple que se puede realizar en relación con las docenas de grados de libertad que poseen el resto. Esto que hace que el robot parezca tan simple es quizás la parte más complicada, mover un robot mediante un único movimiento rotativo proporcionado por un motor eléctrico.

El material empleado en la fabricación de los eslabones que forman parte del robot original es *Aluminio 2024-T351*, cuyas propiedades son las siguientes:

**TABLA 3.1. Propiedades del Al 2024-T351**

<b><i>Propiedades</i></b>	
Densidad	2.700 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	73,5 Gpa
Coefficiente de Poisson	0,33
Tensión admisible	425 MPa

La elección de esta aleación se debe a que es un material extremadamente fuerte, con una buena maquinabilidad para uso mecánico y que se poseen datos relativos a otros estudios realizados en el ámbito universitario. El proyecto en el cual fue analizado, realizado por la Universidad Politécnica de Madrid, es “*Generación de un campo de tensiones residuales de compresión en Aluminio 2024-T351 mediante tratamiento por onda de choque generada por laser [14]*”.

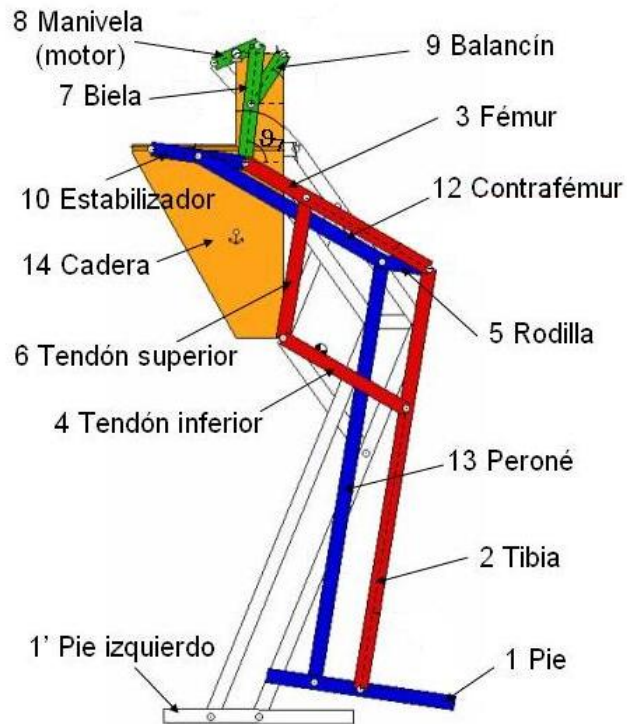
El conjunto mecánico del Pasibot consta de una gran cantidad de piezas, en definitiva, se ha llegado a diseñar un total de 38 piezas distintas, alcanzando una cantidad de 213 piezas en su conjunto. Este número de piezas no es fijo ya que en el

estudio del Pasibot se procede a la inclusión o exclusión de piezas con el objetivo de mejorar su funcionamiento y su rendimiento del análisis. En definitiva, el modelo a analizar en este proyecto será el que consta del número de piezas antes mencionado. A continuación, se expone una tabla detallada en la que aparece el nombre de la pieza junto con la cantidad de piezas de la misma que se encuentran en el robot.

***TABLA 3.2. Elementos de los que consta el Pasibot.***

Nombre	Número	Nombre	Número
PERONE	2	MOTOR	1
RODAMIENTOS	34	ENGRANAJE GRANDE	1
TIBIA	2	ENGRANAJE MEDIANO	1
RODILLA	1	ENGRANAJE PEQUEÑO	1
CONTRAFÉMUR	2	ENGRANAJE CON AGUJEROS	1
TENDÓN INFERIOR	2	EJE GRANDE	8
SEPARADOR	4	ROSCA MOTOR	8
FÉMUR	2	ROSCA BASE MOTOR	4
TENDÓN SUPERIOR	1	TUBOS CADERA	2
ESTABILIZADOR	1	DESLIZADERA	1
BIELA	2	ENGANCHE MOTOR	4
BALANCÍN	1	TUBOS ROSCADOS	1
MANIVELA	1	CADERA EXT. IZQUIERDA	1
PIE	2	CADERA INT. IZQUIERDA	1
ARANDELA	18	CADERA EXT. DERECHA	1
TORNILLO_16	6	CADERA INT. DERECHA	2
TORNILLO_21	8	CORREA	1
TORNILLO_27	4	CORREDERA	18
TORNILLO_38	4	RODAMIENTO EJE PRINCIPAL	1

A continuación se aprecia un diagrama detallando todos los elementos que componen el pasibot y que fueron detallados en la tabla anterior.



**IMAGEN 3.1. Nomenclatura de los componentes del Pasibot**

### **3.2.Funcionamiento del mecanismo del Pasibot**

El funcionamiento del pasibot se puede definir mediante el desarrollo de tres partes principales relacionadas con la transmisión de movimiento. Las tres partes de las que consta son:

- Chebyshev
- Extensión
- Estabilizador

### **3.2.1. CHEBYSHEV**

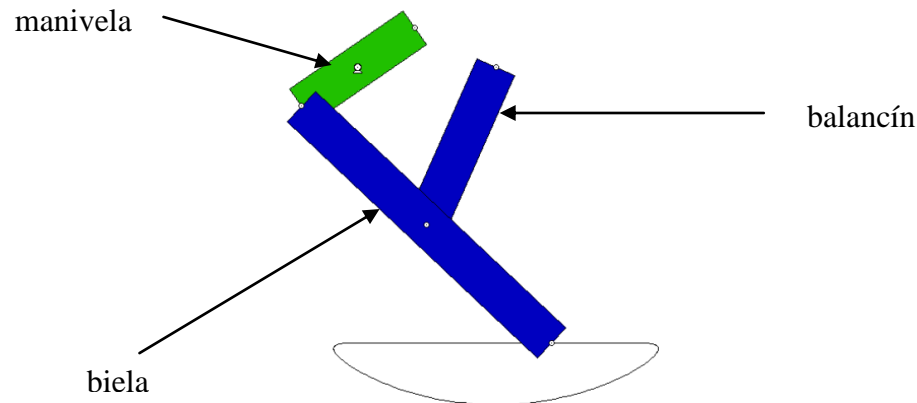
Pafnuty Lvovich Chebyshev fue uno de los matemáticos más celebres del siglo XIX. Ruso de nacimiento, creó varias escuelas de pensamiento matemático en Rusia. A efectos de un resumen podemos clasificar los trabajos matemáticos de Chebyshev en las cuatro ramas siguientes: Mecanismos y Teoría de la Aproximación de Funciones, Teoría de los Números, Teoría de Probabilidades y Teoría de Integración. Sin embargo escribió acerca de muchos otros temas: formas cuadráticas, construcción de mapas, cálculo geométrico de volúmenes, etc. Lo que nos interesa para explicar el funcionamiento del Pasibot será la rama de Mecanismos y Teoría de Aproximación de las Funciones [1].



**IMAGEN 3.2. Retrato de Chebyshev**

El mecanismo de CHEBYSHEV consiste básicamente en un mecanismo biela-manivela. Este será el mecanismo principal del robot. Con este mecanismo conseguimos convertir el movimiento circular que nos aporta el motor en un movimiento trasnacional que consta de dos partes, una casi recta en la mitad de su ciclo y otra elíptica en la otra mitad, es decir, describe un recta y media elipse. El movimiento recto del punto de referencia corresponderá con el período durante el cual el pie este totalmente apoyado, mientras que el otro pie se encontrará en el periodo de movimiento elíptico. El movimiento elíptico del pie que se encuentre en fase de balanceo hará que se desplace hacia adelante hasta que se encuentre totalmente apoyado, momento en cual comenzará a soportar todo el peso del robot y comenzará el periodo de movimiento

rectilíneo de su punto de referencia y, en consecuencia, el periodo de movimiento elíptico del otro pie.



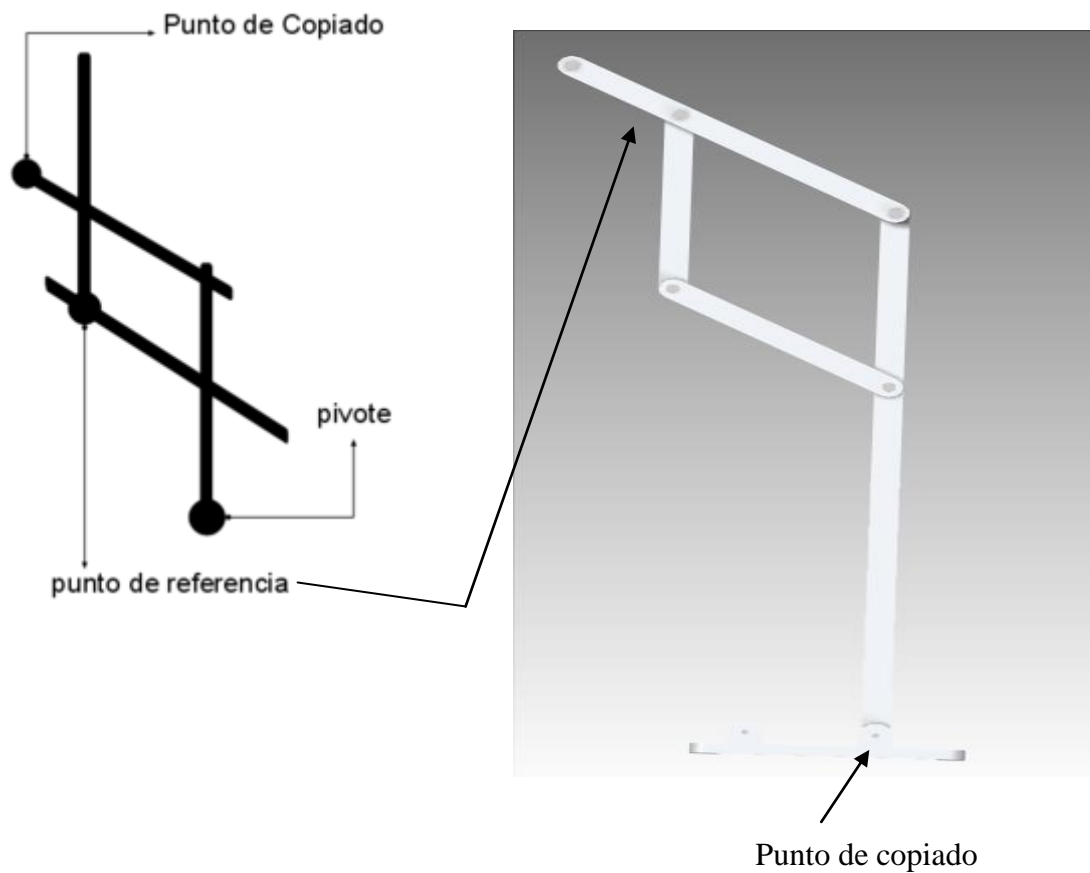
**IMAGEN 3.3. Representación del movimiento del chebyshev dentro del Pasibot.**

La manivela genera el movimiento circular, es la que se encuentra conectada al motor. El balancín está unido por un lado a la biela y por otro a la biela. La biela es la que realiza el movimiento elíptico/rectilíneo gracias a su conexión con la manivela y el balancín.

### **3.2.1. EXTENSIÓN**

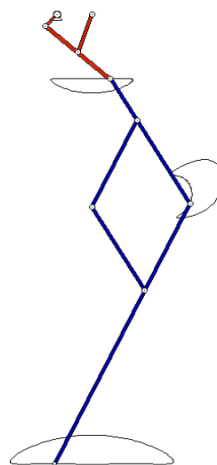
Una vez realizado el movimiento del Chebyshev, se pasa al segundo movimiento que hace posible el funcionamiento del Pasibot, el pantógrafo (del Griego παντ, todo, y γραφ, dibujo, imagen)[2], que es un mecanismo articulado basado en las propiedades de los paralelogramos. Su teoría de funcionamiento fue descrita primeramente por Descartes y luego ideada por un jesuita llamado Christopher Scheiner, teniendo esta múltiple utilidad. En la que nos centraremos es su utilidad en el campo del dibujo.

El funcionamiento del pantógrafo consiste en copiar una figura, o más bien reproducirla, a una escala distinta. El pantógrafo está compuesto por una serie de varillas unidas a un punto fijo denominado pivote sobre el cual se mueven. Según la configuración de los elementos las escalas son variables, siendo necesario variar la distancia entre las rótulas, pero a condición de mantener el paralelismo entre varillas. La función de introducir el pantógrafo a continuación del Chebyshev es la de aumentar e invertir el movimiento creado por este último.



**IMAGEN 3.4. Esquema de funcionamiento del pantógrafo**

Con el conjunto de elementos introducidos, es decir, el Chebyshev y el pantógrafo, se consigue el movimiento que se aprecia en la imagen 3.4. En la imagen 3.5, se aprecia como quedan los elementos colocados como parte del robot y las trayectorias que realiza.



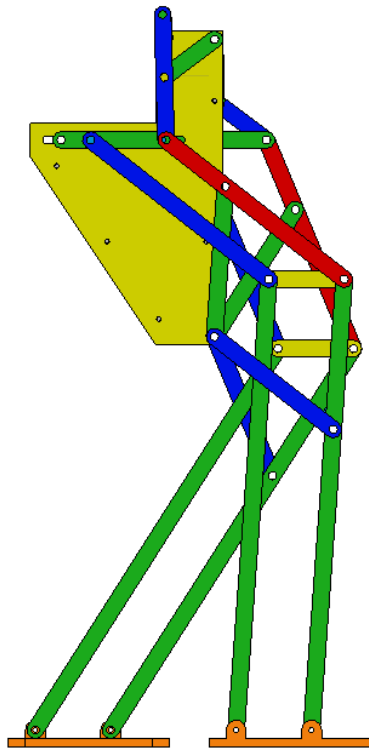
**IMAGEN 3.5. Mecanismo completo del pasibot.**



### **3.2.3. MECANISMO DE ESTABILIZACION**

Después de haber conseguido el movimiento que se estaba buscando para que el Pasibot fuese capaz de realizar un paso de la manera deseada, era necesario también que el robot se mantuviese estable en dicho proceso. El problema reside en si el modelo es capaz de soportar el movimiento sin volcar. Para solucionar este problema lo que se ha hecho ha sido introducir un elemento estabilizador en forma de deslizadera enganchada a la cadera. De esta manera, tenemos la deslizadera, la rodilla y el pie siempre paralelos al suelo y evitamos que vuelque el Pasibot.

La solución original que se adoptó fue poner una corredera fija a la cadera en donde se encuentran los extremos fijos de la manivela y la biela pertenecientes al mecanismo de Chebyshev.

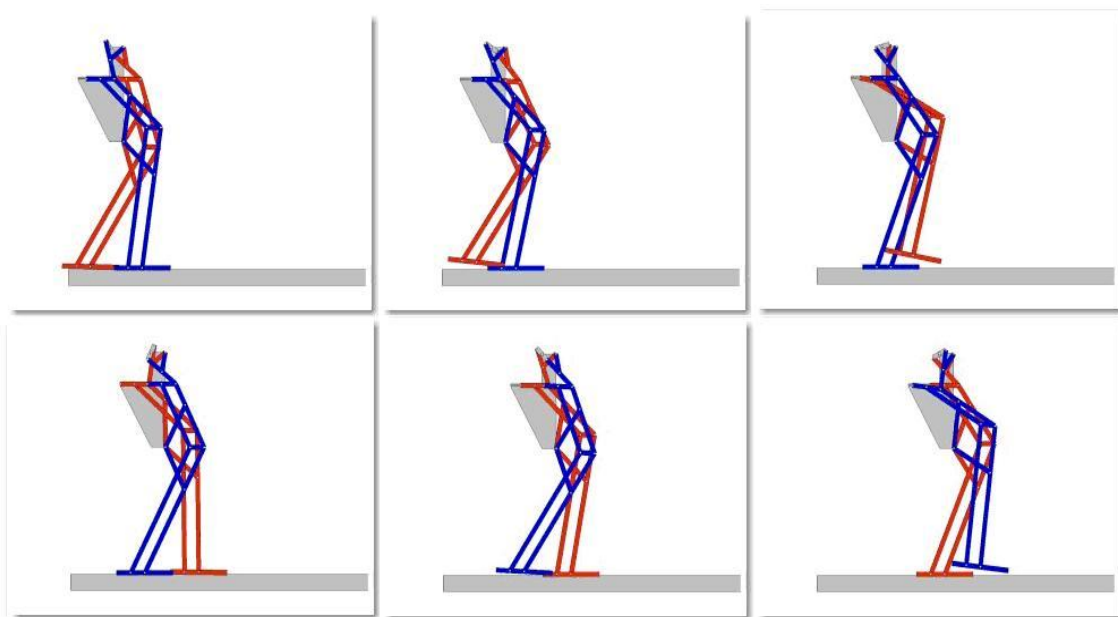


**IMAGEN 3.6.**Imagen del pasibot en el programa de simulación MSC ADAMS.

La corredera está unida a un eslabón “estabilizador”, unido a su vez con el punto de referencia del pantógrafo y también unido a un sistema paralelo al pantógrafo, el *mecanismo de estabilización*, que obliga a que el ángulo descrito por ambos eslabones sea el mismo. Esta corredera solo permite movimiento en la dirección paralela al suelo, con lo cual los eslabones transmiten a su vez este movimiento al resto del mecanismo.

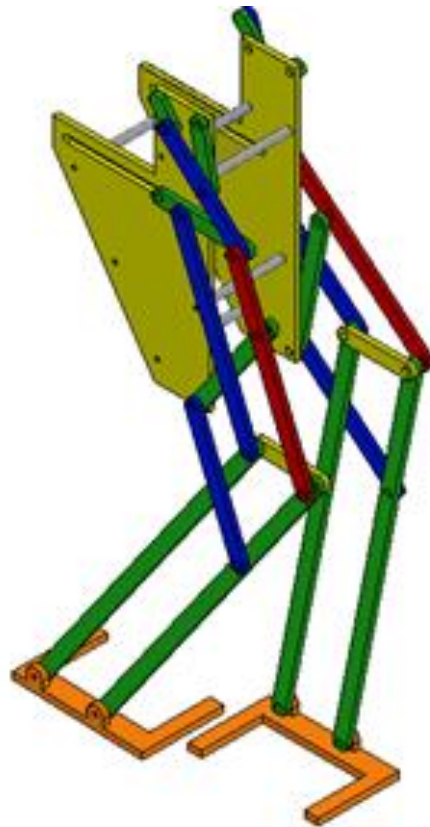
Ambos mecanismo terminan en el mismo eslabón, que es el pie, con lo cual este siempre permanecerá paralelo a la superficie, (posteriormente como se observa en la imagen se demuestra que no es del todo cierto).

En la imagen se puede observar en azul el mecanismo estabilizador unido mediante el eslabón “estabilizador” al pantógrafo como se describió anteriormente. En concreto en esta imagen se observa como la pierna izquierda del fondo está apoyada totalmente en el suelo (tramo recto del periodo de recorrido de la manivela) y la pierna derecha está realizando el paso para avanzar (tramo curvo del periodo de recorrido).



**IMAGEN 3.7. Representación del paso.**

De esta forma se obtiene el mecanismo completo de transmisión de movimientos del Pasibot. Como el robot debe de ser simétrico, una vez que se conoce el diseño de una pierna, se puede obtener directamente el diseño completo del robot. Por lo que el diseño del Pasibot original queda de la siguiente forma:



**IMAGEN 3.8. Pasibot**

El prototipo inicial que se observa en la imagen, (el cual no tiene en cuenta el peso del sistema de transmisión alojado en las caderas), tiene un peso total de 5,077Kg, para el material anteriormente descrito *Al 2024-T351*.



## **CAPÍTULO IV: Desarrollo del proyecto.**



## **CAPITULO IV: DESARROLLO DEL PROYECTO**

### **4.1. DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS UTILIZADAS**

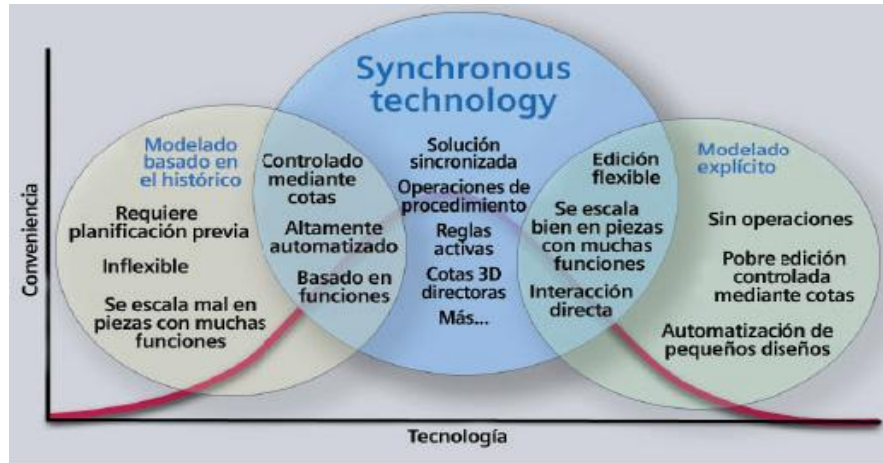
Para el diseño de los elementos mecánicos del Pasibot se ha empleado una herramienta de diseño CAD, es decir, Diseño Asistido por Ordenador. La herramienta elegida es el **Solid Edge ST**, en donde ST significa Tecnología Síncrona. Esta versión del Solid Edge, está evolucionada con respecto a las anteriores mejorando la plataforma de trabajo y las posibles modificaciones posteriores. Ateniéndonos a la explicación del fabricante exponemos lo siguiente: << Solid Edge® with Synchronous Technology es una versión innovadora que ofrece un nuevo paradigma de modelado que combina la velocidad y la flexibilidad del modelado explícito con el control y la previsibilidad del diseño parametrizado>> [3].



**IMAGEN 4.1. Imagen inicial de arranque del programa Solid Edge ST.**

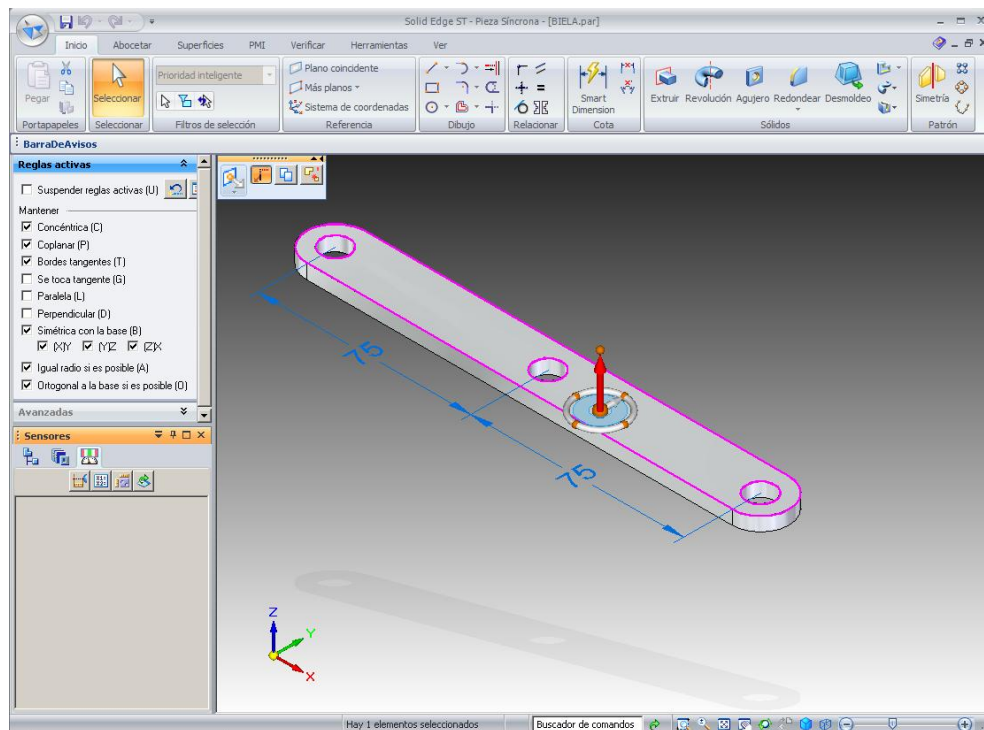
La ventaja de esta versión es que permite modificar dinámicamente un sólido importado, sin tener que pasar por la laboriosa tarea de modificar los bocetos de las operaciones que lo han generado. La evolución de este programa ha surgido de la necesidad de los diseñadores, esto facilita los procesos de poder editar, modificar y personalizar cualquier diseño de CAD con dicho software, independientemente de la persona que lo diseñó, cómo lo hizo y con qué sistema CAD fue creado el diseño.

En la siguiente figura se puede apreciar las mejoras y el ámbito de trabajo que abarca esta nueva evolución del Solid Edge.



**IMAGEN 4.2.** Gráfica explicativa de lo que aporta la tecnología síncrona.

En definitiva, para el diseño de las piezas la siguiente imagen dejará más claro la forma en la que se ha desarrollado el proceso.



**IMAGEN 4.3.** Vista del diseño de un elemento del Pasibot en Solid Edge.



Una vez diseñado el modelo y montado, es necesario pasar a simular su funcionamiento dinámico. Este proceso no se puede realizar con la herramienta antes definida Solid Edge ST. Para este proceso hay que introducir una nueva herramienta de trabajo en el ámbito del análisis. La herramienta elegida es el programa **MSC ADAMS**. Según el fabricante: <<Adams es el software de análisis de movimiento y dinámica multi-corporal más utilizado en el mundo. Adams ayuda a los ingenieros a estudiar la dinámica de partes en movimientos, estudiar como las cargas y las fuerzas están distribuidas a través del sistema mecánico y ayuda a mejorar y optimizar el funcionamiento de sus productos>> [4].

**MSC ADAMS** es un soporte que facilita la modificación de sistemas mecánicos sin tener que pasar por el largo y caro proceso de hacer prototipos e ir probándolos. A diferencia de la mayoría de los programas CAD, ADAMS es capaz de resolver ecuaciones de manera instantánea para: cinemática, estática, cuasi-estática y dinámica, gracias a las ecuaciones de la física que utiliza. No obstante, no es perfecto y produce errores, a veces de manera continua, debido a que a través de estas ecuaciones de la física está intentando simular la realidad. No obstante, los resultados son más que aceptables y muy útiles para modificar el desarrollo de nuestro elemento mecánico.



[www.crack99.com](http://www.crack99.com)

**IMAGEN 4.4.** Imagen inicial del programa MSC ADAMS

## **4.2. PROCESO DE DISEÑO**

El proceso de diseño se ha realizado con la utilización de la herramienta CAD antes mencionada. Como la misión de este proyecto no ha sido la de diseñar ni la de modificar los elementos del modelo existente del Pasibot, no entraremos demasiado en detalle en el proceso de diseño. Lo que haremos será mencionar los procesos realizados en el diseño con Solid Edge ST.

Para modelar un conjunto mecánico como el que estamos tratando, el Pasibot, es necesario ir haciendo el diseño por partes. En otras palabras, no puedes dibujar todo el robot, sino que se va diseñando pieza por pieza para posteriormente ir las ensamblando en un conjunto de piezas que resulta en el producto final, el Pasibot. De hecho, haremos simplemente una lista de los comandos más utilizados, utilizados para aproximadamente el 95% de las piezas.

- Se selecciona la pieza ISO Síncrona en la ventana de inicio del programa.
- Especificar el plano del dibujo.
- Utilizando los comandos de dibujo localizados en la barra de herramientas, proceder a dibujar el boceto deseado.
- Extrusión de la región abocetada.
- Procesos a realizar una vez está hecha la pieza.
  - Activar el comando agujero, y realizar un agujero en la zona deseada.
  - Realizar un vaciado.
  - Elección del material.

Una vez que se han realizado todas las piezas, vaciados, extrusiones, etc., se procede a unir las piezas y crear subconjuntos. Los subconjuntos a su vez se unen formando el conjunto final. Es de especial interés la destreza a la hora de hacer las uniones, esto se debe a que una unión imperfecta implicará una gran cantidad de errores a la hora de exportar el conjunto del soporte de diseño al soporte de análisis. Para evitar estos problemas se ha procedido a realizar dos tipos de diseño. Uno de los diseños es el diseño completo del Pasibot, con todo lo que lleva. El segundo diseño es el denominado Pasibot simplificado, siendo este el que utilizaremos a lo largo de este proyecto.

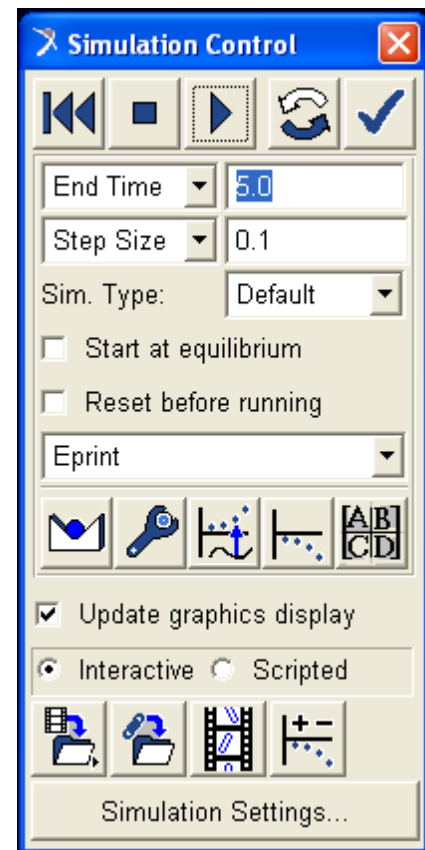
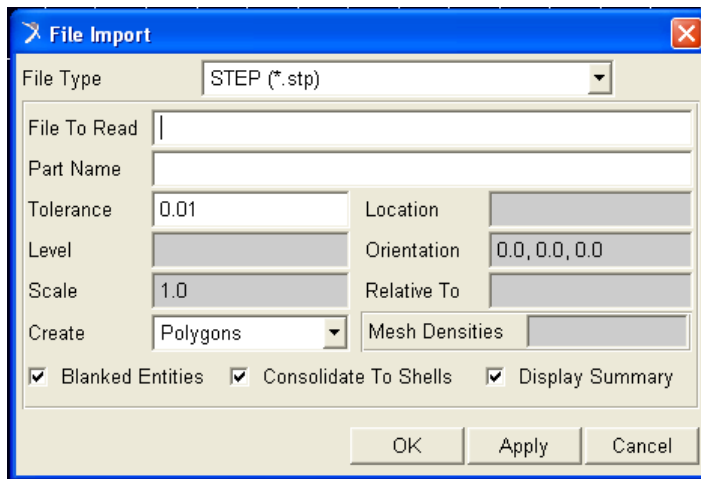
La diferencia entre los modelos es escasa, únicamente que se han eliminado los elementos que causan problemas a la hora de exportar el conjunto. Por ejemplo, se

eliminan los rodamientos, elementos de unión en las juntas y el motor se simula como una masa puntual que genera movimiento. A primera vista podría parecer que se está perdiendo veracidad en los cálculos al hacer estas modificaciones, pero en realidad, se está simplificando el proceso de cálculo mientras que se consigue una aproximación del 98% a la realidad, cifra más que aceptable.

Una vez realizado el modelo, pasamos a exportarlo a MSC ADAMS, nuestro software de análisis. Considerando que es la herramienta que más se ha utilizado en este proyecto, haremos un poco más de énfasis en el programa de análisis de lo que se ha hecho en el programa de diseño. La idea no es la de introducir un tutorial dentro del proyecto, sino solo la de enfatizar los elementos importantes con los que se ha trabajado e incluir algunas imágenes para que el lector se pueda familiarizar un poco más con el programa.

Para empezar a simular en MSC ADAMS es necesario empezar importando las piezas desde SOLID EDGE. No es posible importar el sistema entero ya que a la hora de interpretarlo el programa lo tomará como una única pieza. Por tanto, para proceder al montaje en MSC ADAMS, procederemos a importar pieza por pieza y luego montarla.

Para importar una pieza se utilizará el formato .igs, formato que es casi universal y según varias comprobaciones es el que menos problemas presenta para poder trabajar adecuadamente. Para proceder a importar es necesario abrir la aplicación ADAMS/View y crear un modelo nuevo. Posteriormente se accede a la tecla de importar y se selecciona el archivo deseado, .igs en este caso. Accediendo al botón part name, se le da un nombre a la parte en cuestión, introduciendo un valor en el formato .model\_Xpart\_Y donde X e Y son números, aparte de esto es necesario también identificar la pieza con un Id, un identificador, en el cual pondremos el número de la parte. Una vez hecho esto, se da al OK y ya se tiene la pieza creada. Es importante destacar la importancia de los ejes utilizados en el proceso de diseño, ya que en los dos programas, la notación de suelo es distinta. Para evitar el problema antes mencionado de que se importe como una única pieza en vez de cómo un elemento mecánico, el proceso idéntico pero con la extensión con la que lo debemos guardar será la de parasolid.x\_t.

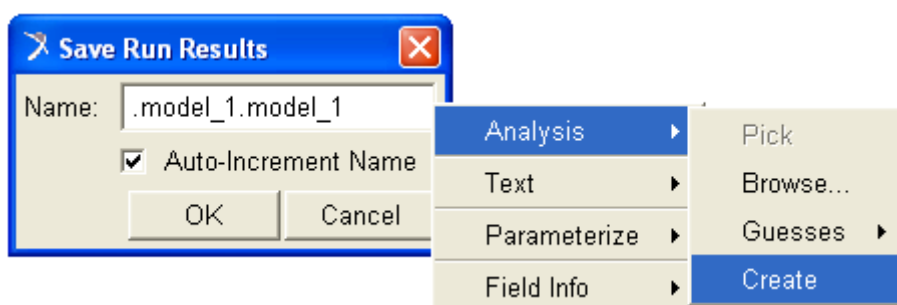


**IMAGEN 4.5. Barra de herramientas para la simulación.**

Una vez detallado el proceso de exportar las piezas desde SOLID EDGE a MSC ADAMS definiremos el proceso de hacer que se mueva el robot, en definitiva, realizar la simulación. Para ello nos vamos a la ventana activa por defecto denominada MAIN TOOLBOX, hay que seleccionar el icono de INTERACTIVE SIMULATION CONTROLS y ampliar la ventana.

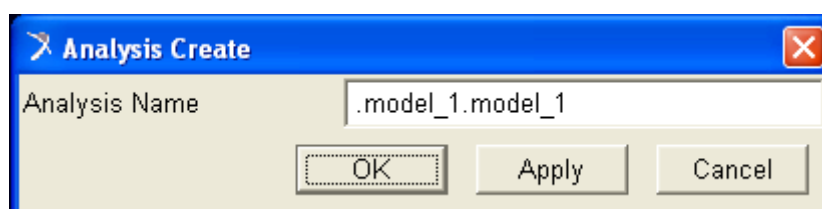


seleccionando este botón, aparecerá la siguiente figura:

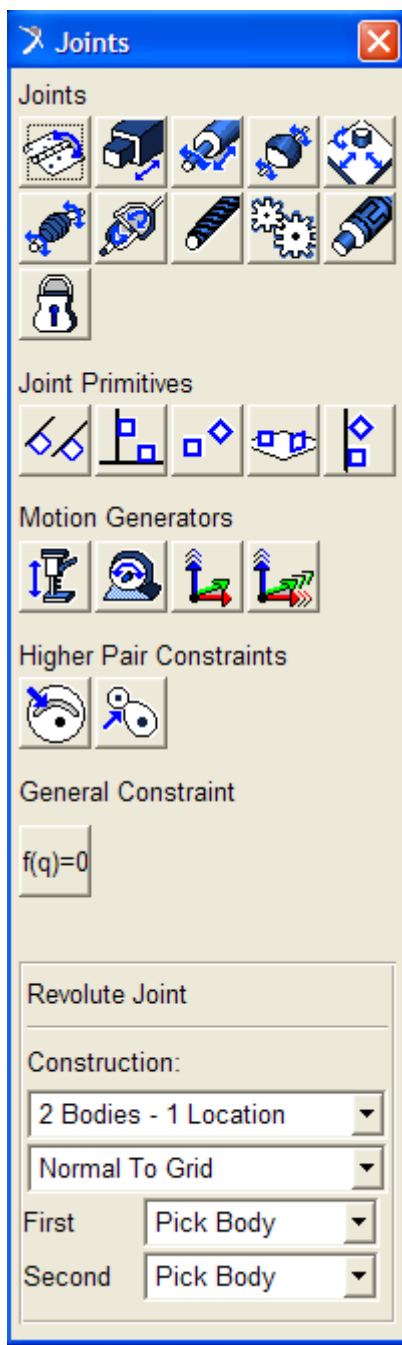


**IMAGEN 4.6. Desplegable de resultados en la simulación.**

Haciendo el proceso anterior aparecerá una ventana como la que sigue. El nombre se debería cambiar para cada simulación ya que en caso de no hacerlo se irán sobrescribiendo una sobre la otra y perderemos la información deseada.



**IMAGEN 4.7. Ventana para guardar los datos de la simulación.**



En la imagen 4.8, se ve la barra de las juntas. Esta tabla se utiliza para darle el movimiento al robot. Como hemos comentado antes, el modelo simplificado no tiene el motor incluido, por tanto, lo que se hace es introducir una junta con movimiento donde estaría el motor a la velocidad deseada. Es esta junta la que proporciona el movimiento rotatorio que luego acciona la manivela y hace moverse al Pasibot.

#### DATOS DE LA SIMULACIÓN

Velocidad del estudio:  $\omega = 95 \text{ }^\circ/\text{s}$ .

Nº de pasos = 1000

Tiempo de simulación = 20 s.

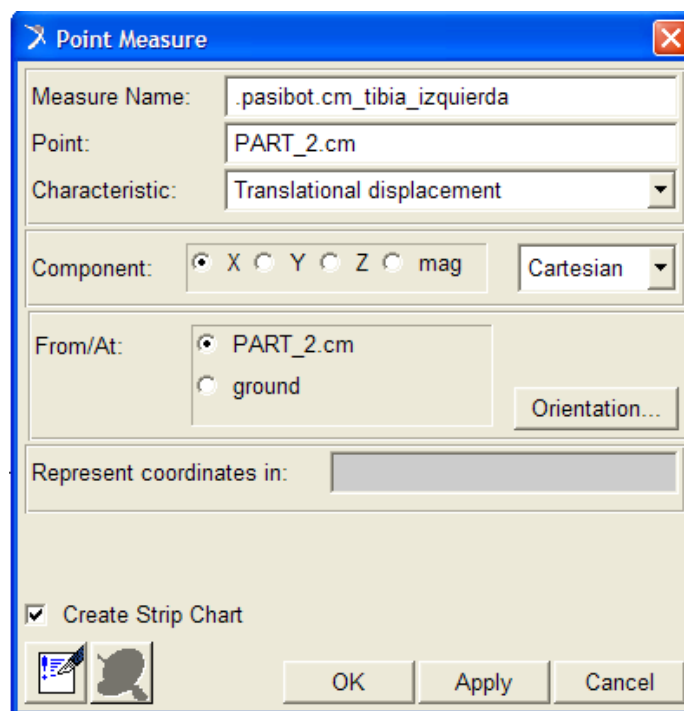
Todos estos parámetros son modificables según los requerimientos. Se ha procedido a 1000 pasos para tener medidas de sobra y los 20s para poder tener una cantidad suficiente de pasos, siempre es útil simular más de tres pasos.

**IMAGEN 4.8.** Desplegable que permite modificar la velocidad de giro del motor.

### **4.3. PROCESO DE MEDIDA**

Una vez realizado el proceso de exportación del modelo, montarlo y animarlo, nos queda el apartado de realizar las medidas. Para esto, se tiene que ir a la pieza deseada. Una vez sobre la pieza se seleccionará con el botón derecho, y se podrá medir tanto el centro de masas de la pieza como los distintos markers que posea. Esto se hace con el fin de tener un mayor número de datos del comportamiento del sistema. Un marker es un punto introducido en una localización estratégica del elemento para así poder tener más información de las velocidades, esfuerzos, etc. que sufre el robot en el proceso de la marcha.

Una vez seleccionado el punto de medida se selecciona la opción de measure. La imagen que aparecerá será la siguiente:



**FIGURA 4.9. Cuadro de dialogo para la medida de los elementos en cuestión.**

Como se puede apreciar en la gráfica, las medidas se hacen sobre los tres grados de libertad, también se puede ver que hay una pestaña desplegable donde se lee: characteristic, en la cual se puede cambiar la magnitud a medir. Las magnitudes que se han medido en este proyecto son básicamente todas las que ofrece el programa y en los tres ejes. A continuación se expondrán en forma de tabla.

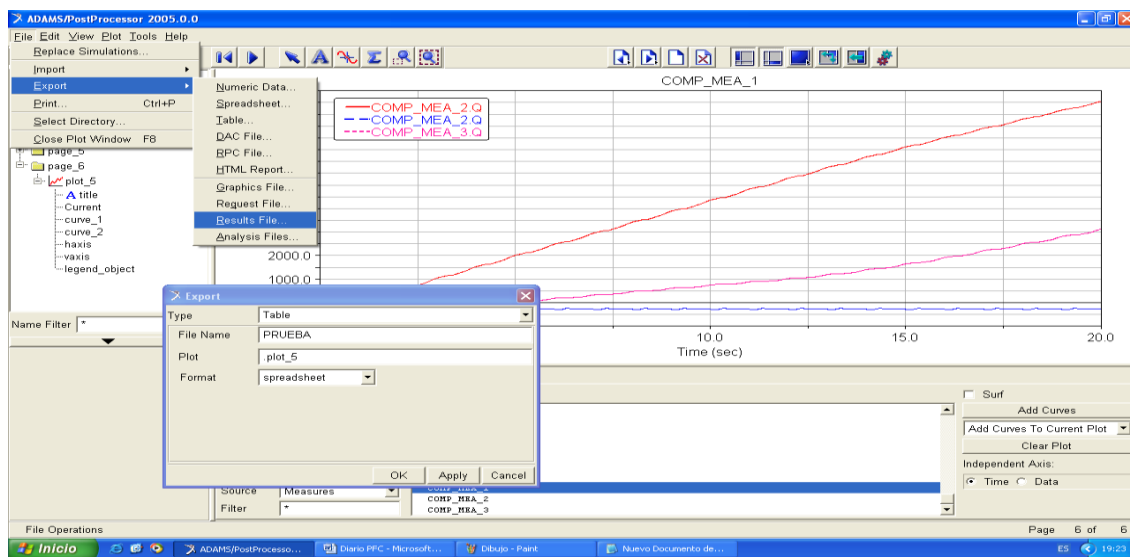
**TABLA 4.1. Magnitudes medidas.**

<b>CENTRO DE MASAS</b>	<b>MARKER</b>
ACELERACIÓN ANGULAR	ACELERACIÓN ANGULAR
ACELERACIÓN LINEAL	ACELERACIÓN TRASLACIONAL
VELOCIDAD ANGULAR	FUERZA
VELOCIDAD LINEAL	MOVIMIENTO TRASLACIONAL
MOMENTO	PAR
POSICIÓN	VELOCIDAD ANGULAR VELOCIDAD TRASLACIONAL

Una vez definidas las magnitudes a medir, se procede a hallar los valores de las mismas. En las medidas de MSC ADAMS se pueden recolectar los resultados de las mediciones mediante gráficas o mediante datos. La extracción de datos será de manera numérica, esto es porque un gráfico es más bien orientativo, en cambio, si se poseen los datos, se poseen todos los valores de todos los elementos y facilitan el posterior análisis cinemático y/o dinámico. Por tanto, se extraerán los valores y se exportarán a otro soporte informático con el cual se puedan tratar de manera más sencilla. Este soporte es el Excel.

La imagen siguiente muestra como se ve en MSC ADAMS cuando analizas una gráfica, para redimir los valores es necesario exportarlos. Para ello se selecciona en **file**, se va a **export** y luego a **results file**. En este cuadro se determina el nombre de la gráfica y posteriormente se designa un destino para almacenarlo. Una vez realizado el proceso, ya están los datos en formato adecuado para poder manipularlos en el Microsoft Excel.





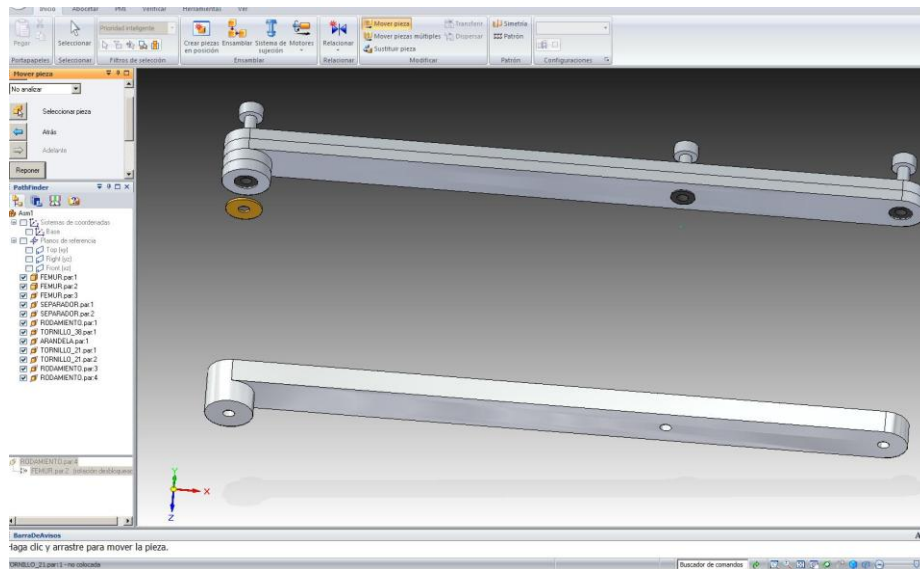
**IMAGEN 4.10. Vista de gráficas en el proceso de exportar a Excel.**

#### **4.4. ESTUDIO Y SIMULACION EN MSC ADAMS**

Para empezar el estudio, se necesita importar el modelo del Pasibot del programa *Solid Edge ST<sup>®</sup>* al programa *MSC. ADAMS<sup>®</sup>*. Para ello se guardará el modelo en formato “*parasolid*” el cual es compatible para ambos programas, y se seguirán los pasos anteriormente descritos para la importación de archivos.

Para el estudio del Pasibot se ha utilizado un modelo simplificado del modelo creado en *Solid Edge*, para evitar sobrecargas en el programa *Adams*. Este hecho es posible debido a que *Adams* es un programa que estudia el comportamiento del sólido rígido y no tiene en cuenta ni las deformaciones ni el contacto entre los diferentes componentes.

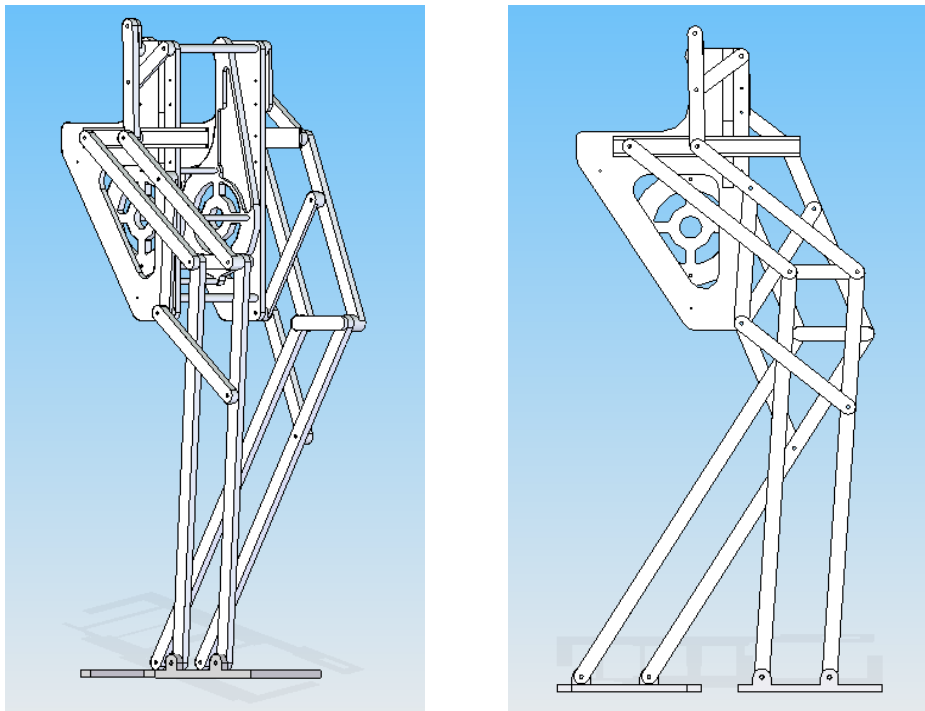
Se ha creado por lo tanto un modelo simplificado en el que se han suprimido todo tipo de arandelas, rodamientos, separadores y tornillos, también se ha simplificado el modelo de eslabón reduciéndolo a una sola pieza en vez de las dos de las que consta el prototipo, y donde tampoco se ha exportado el sistema motriz (motor, engranajes, correas, etc) para evitar la sobrecarga del software. Los tornillos no son necesarios ya que obtenemos la misma función con la inserción de juntas entre los diferentes eslabones quedando de este modo:



**IMAGEN 4.11. Simplificación del fémur para Adams**

Como podemos observar con la reducción se pasa de 15 piezas a una sola. Esto facilita enormemente el manejo del conjunto en Adams.

Utilizando esta misma técnica para todas las piezas que forman parte del conjunto obtenemos el siguiente modelo, que será el finalmente utilizado:



**IMAGEN 4.12. Pasibot simplificado para Adams**

Una vez que tenemos el modelo solo falta importarlo al programa y comenzar el estudio.

#### **4.5 ELEMENTOS ANALIZADOS:**

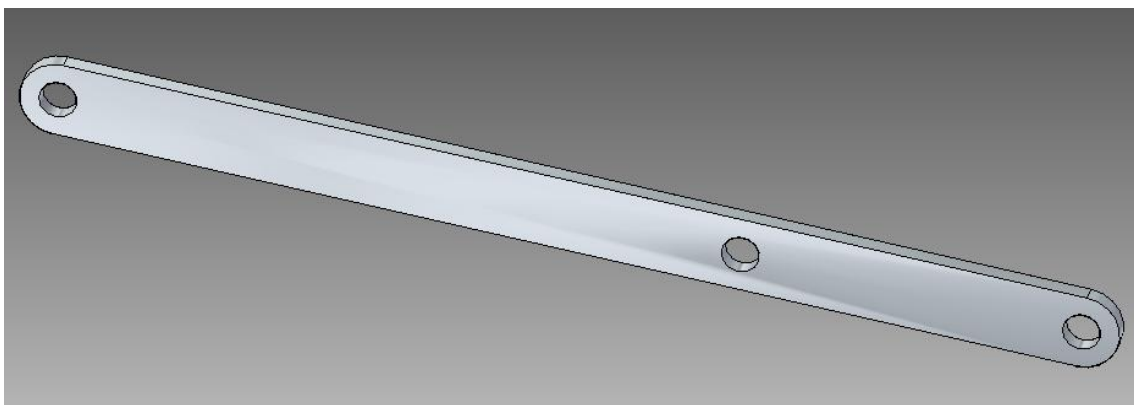
Para entender un poco mejor el análisis realizado y expuesto en el siguiente apartado, se ha recurrido a explicar con un poco mas de detalle los elementos a estudiar. Para esto, se ha recurrido al proyecto de Fin de Carrera anterior a este y realizado por Oscar García de Oteyza, titulado **DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN NUEVO SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN PARA EL ROBOT BÍPEDO PASIBOT**. Las siguientes imágenes y tablas han sido sacadas directamente de dicho proyecto ya que el alumno en cuestión es quien se ha encargado del diseño del Pasibot actual, el cual estamos estudiando.

#### **Fémur:**

El fémur está conectado en su parte superior con el estabilizador y la biela, en su parte central con el tendón superior y en su parte inferior con la tibia y la rodilla. Es uno de los elementos que hace posible el correcto funcionamiento del mecanismo de Pantógrafo.

**TABLA 4.2.**

<i>Fémur</i>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,149 kg



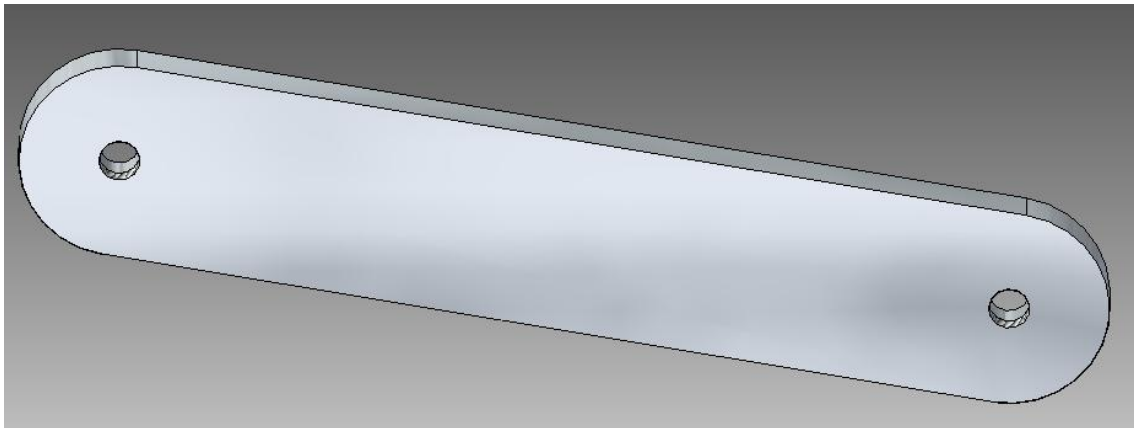
**IMAGEN 4.13. Fémur**

**Rodilla:**

La rodilla es el nexo de unión entre el fémur y la tibia, y a su vez del contrafémur y el peroné. Sirve de soporte físico para la unión del mecanismo Pantógrafo y el Estabilizador. Realiza el mismo movimiento que el estabilizador debido a su ubicación dentro del mecanismo.

**TABLA 4.3.**

<b><i>Rodilla</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,057 kg



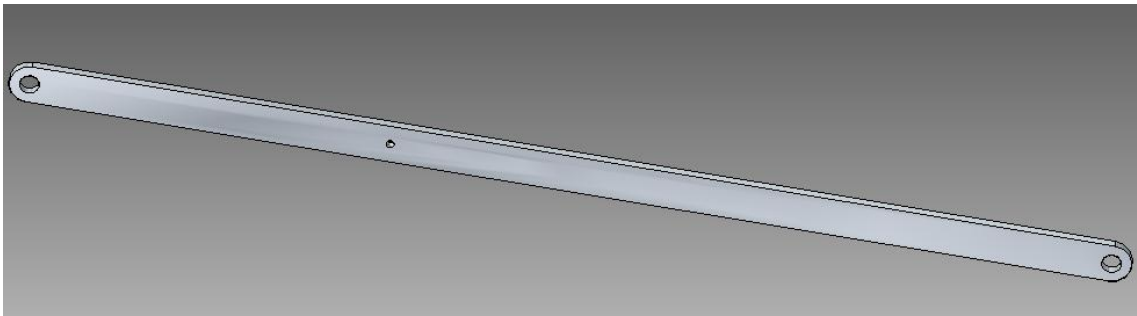
***Imagen 4.14. Rodilla***

**Tibia:**

La tibia está conectada en su parte superior con la rodilla y el fémur, en su parte central con el tendón inferior y en su parte inferior con el pie (punto de copiado del Pantógrafo). Es el último eslabón del mecanismo de Pantógrafo que realiza la trayectoria aumentada e invertida del Chebyshev.

**TABLA 4.4.**

<i>Tibia</i>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,297 kg



***IMAGEN 4.15. Imagen de la tibia.***

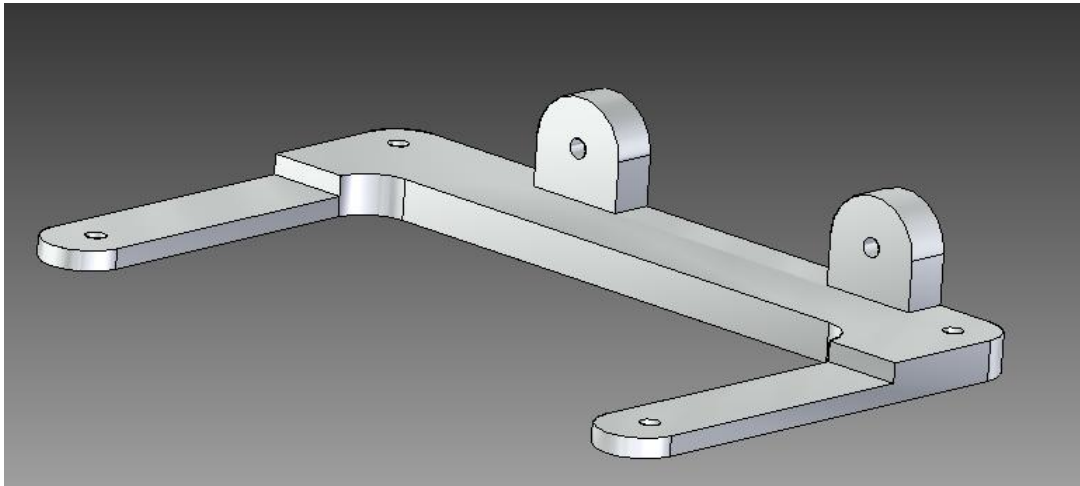
**Pie:**

El pie es el último elemento de toda la cadena cinemática. Es el responsable del contacto del bípodo con el suelo y por lo tanto de su estabilidad y equilibrio. En el pie terminan tanto el mecanismo de Pantógrafo como el de estabilización. Está unido en sus dos orificios con la tibia y el peroné y describe el movimiento de la rodilla, que a su vez describe el movimiento del estabilizador.

En relación a los pies, se decidió cambiar el diseño de los mismos ya que las holguras existentes entre los pies originales no eran suficientes, y por lo tanto estos acababan chocando entre sí en un instante del ciclo.

**TABLA 4.5.**

<i>Pie</i>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,235 kg



**IMAGEN 4.16. Pie izquierdo**

El análisis posterior se basará en las mediciones realizadas con las herramientas informáticas antes expuestas. Se ha procedido a montar primeramente el Pasibot para que nuestro procesador en cuestión sea capaz de analizar los movimientos y proporcionarnos los datos necesarios para el análisis. Una vez realizado esto, se ha procedido a medir el robot con una velocidad determinada. En dicha velocidad se han medido todos los centros de masas y markers que componen la pierna. En este proyecto se ven reflejados los elementos de la pierna izquierda mientras que en el proyecto realizado por Mario Gonzalez Sainz, se ven los elementos de la pierna derecha.

El proceso de medición es quizás el más arduo de este proyecto y el que ha llevado más tiempo. Esto es debido a que una vez modelado el Pasibot y realizado el proceso de simulación, era necesario el postprocesado, es decir, pasar a hojas de datos, con esos datos y sacar las correspondientes gráficas y posteriormente analizarlos en el documento.

Para darle más fundamento al desarrollo de este proyecto, se ha procedido a realizar una segunda serie de mediciones. Como se ha comentado antes, el Sr. Gonzalez Sainz se ha encargado del análisis de la pierna derecha. En dicha pierna se han medido los marker mas esenciales para el proceso de marcha. Debido a la simetría de nuestro bípodo, al analizar una pierna, los resultados son extrapolables a la otra. Por tanto, habiendo analizado el los markers en cuestión, mi labor ha sido la de analizar, siempre en la pierna izquierda, los centros de masa de los elementos básicos antes detallados, los cuales son: pie, rodilla, tibia y femur.

Para este análisis, se ha modificado la velocidad de giro del motor. Con esto, se ha buscado poder comparar el comportamiento de los elementos analizados a distintas velocidades. Debido a las modificaciones, es necesario realizar este proceso de medición y análisis para poder así continuar la evolución futura de nuestro bípodo.

## **CAPÍTULO V: Análisis de los resultados.**

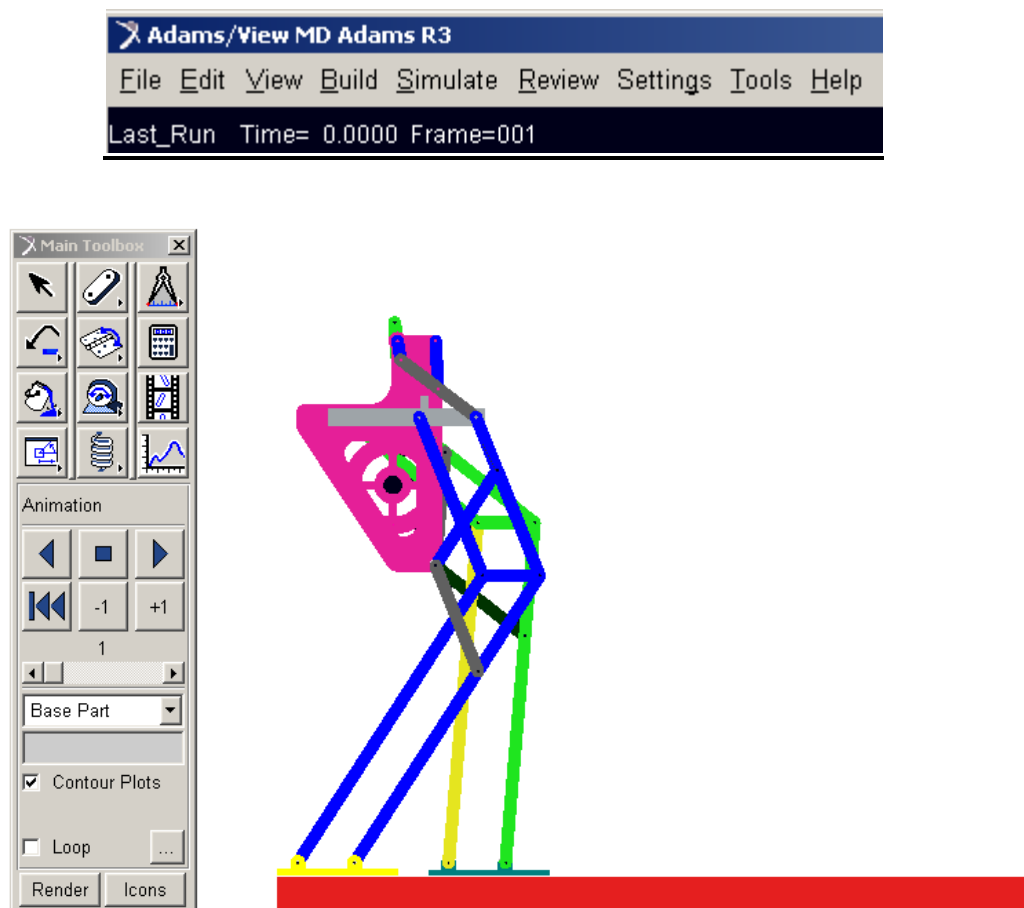




## **Capítulo V: Análisis de los Resultados**

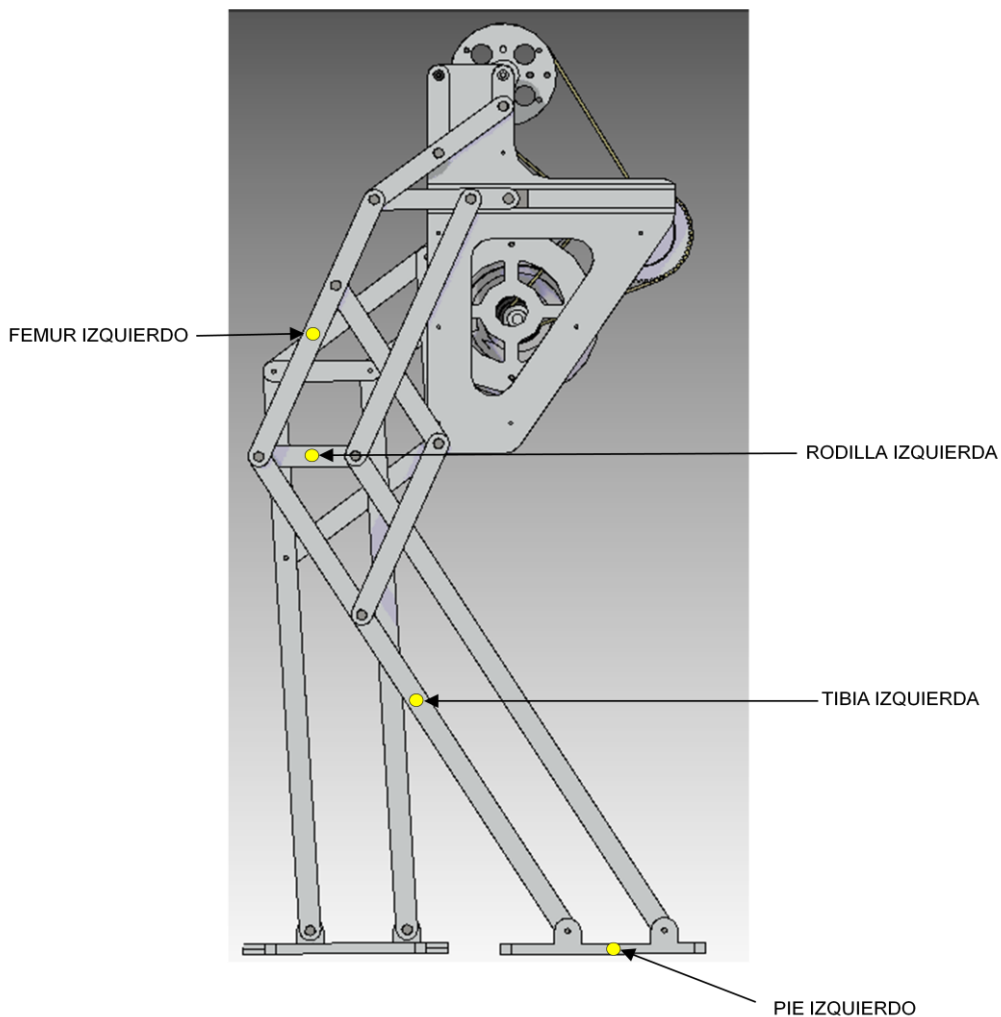
Una vez realizadas las mediciones de las correspondientes simulaciones en MSC ADAMS, es necesario pasar a el análisis de las mismas. Después de medir los correspondientes valores, se ha pasado al post procesador Excel para poder tratar con los datos y no meramente con dibujos de gráficas. Esto nos permite un análisis más en profundidad de los elementos en cuestión y nos permite tener todos los valores para poder modificarlos y juntar las gráficas que nos resultan de mayor interés.

Estos valores gráficos son los que serán utilizados en el futuro para continuar con la evolución del Pasibot, siendo estos los fudamentos para una mejora dinámica del mismo.



**IMAGEN 5.1.** Imagen inicial de MSC ADAMS ante una nueva simulación.

Como bien indica el título, el tema central de este proyecto de fin de carrera es el análisis de los CDM de los elementos básicos del bípedo. Estos elementos básicos son los que hemos visto anteriormente con detalle en lo referente a sus dimensiones, diseño y peso, pie, rodilla, fémur y tibia. En la imagen inferior, se aprecia la imagen del pasibot con los puntos amarillos resaltando los CDM que han sido medidos y analizados en lo restante del proyecto.



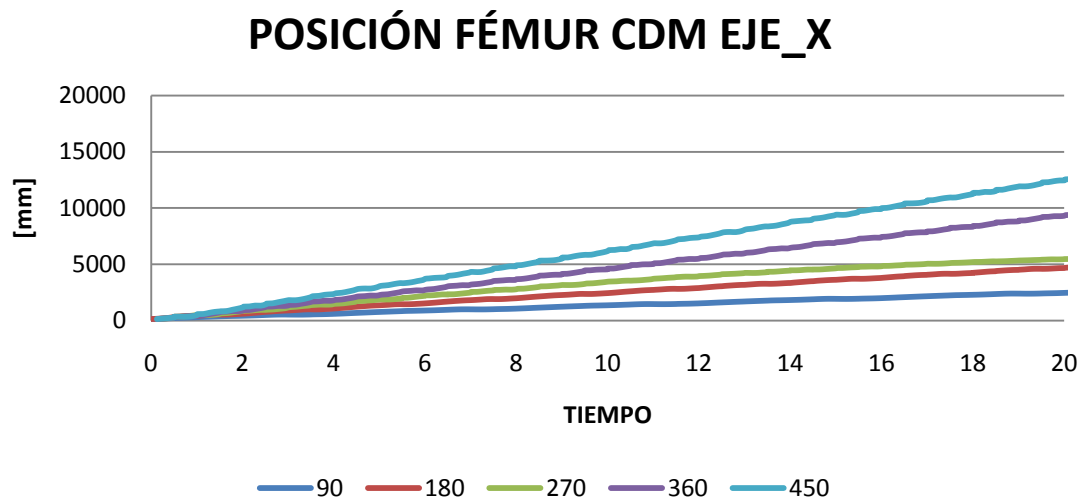
**IMAGEN 5.2. Ubicación de los CDM de los elementos básicos sobre el Pasibot.**

A continuación se expondrán todas las gráficas que tengan importancia en nuestro análisis. Los elementos medidos para los CDM son los siguientes:

- Posición del CDM.
- Velocidad lineal del CDM.
- Velocidad Angular del CDM.
- Aceleración lineal del CDM.
- Aceleración angular del CDM.

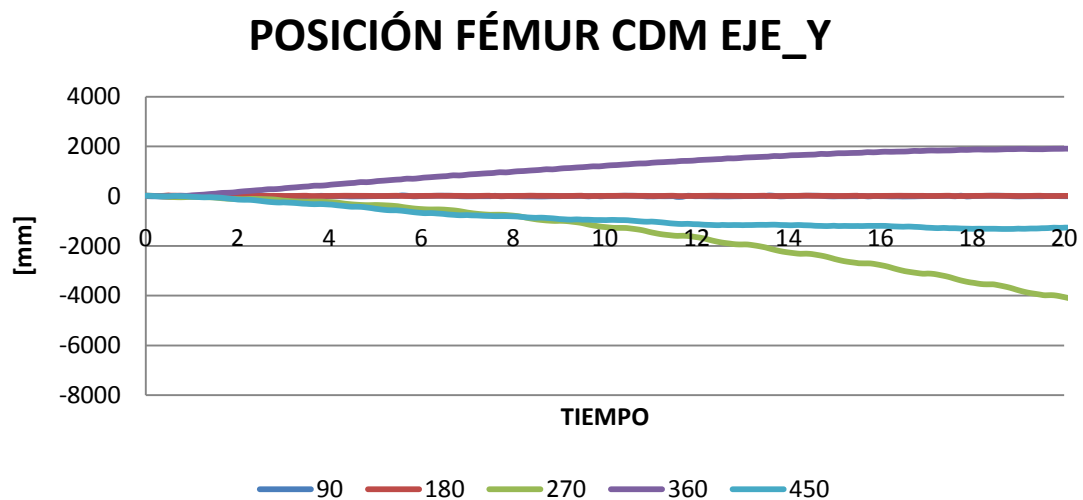
En una primera instancia se ha procedido a medir los valores de posición del fémur. Esto se ha realizado para poder así ver cómo sería el análisis de una pieza por sí sola. Posteriormente, para ahorrar un análisis en detalle que fuese demasiado largo y pesado, se ha procedido a hacer un análisis por cada velocidad de giro. En otras palabras, se han juntado todos los elementos y puesto en común sus gráficas para ver las variaciones de los CDM dentro de un mismo rango de velocidades.

### 5.1. Comparaciones del Fémur



**IMAGEN 5.3.**

La gráfica superior es bastante sencilla de interpretar. Indica la distancia recorrida por el fémur del robot, y será casi idéntica para el resto de elementos, en el tiempo indicado. En este caso son 20s y a mayor velocidad mayor es el recorrido del robot. No aparece ninguna singularidad y todo va acorde con la realidad.



**IMAGEN 5.4.**

En cuanto al desplazamiento no hay nada que destacar en lo referente al eje Y debido a la similitud de todas las piezas en este eje de referencia. Las gráficas aquí apreciadas señalan en qué dirección se moverá nuestro robot con relación a la velocidad. Si es a la derecha los valores serán negativos y si es a la izquierda los valores serán positivos.

### POSICIÓN FÉMUR CDM EJE\_Y

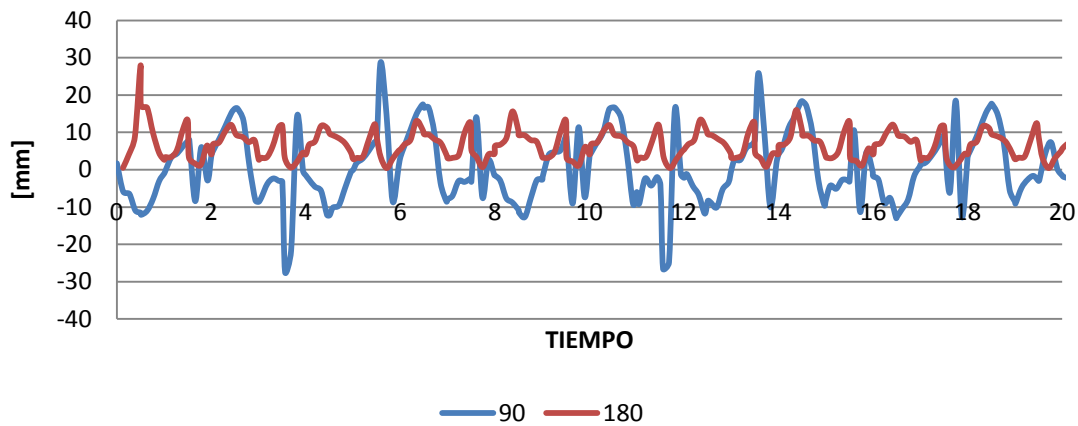


IMAGEN 5.5.

Si nos fijamos más en los valores de posición para 90° y 180° vemos que no es que sean rectos totalmente, sino que las modificaciones de la trayectoria son mucho menores que para las velocidades mayores. Resulta destacable como en estas dos primeras velocidades se mueve más o menos recto con rectificaciones constantes. En el caso de los 90° tiene valores negativos y positivos, es decir, sigue una línea con balanceo. En cambio, en los 180°, es también ese balanceo pero siempre en valores positivos, por tanto, inicialmente se inclina hacia el lado izquierdo de la marcha y no vuelve a la recta inicial, sino que intenta ir recto pero a través de dicho desplazamiento.

### POSICIÓN FÉMUR CDM EJE\_Y

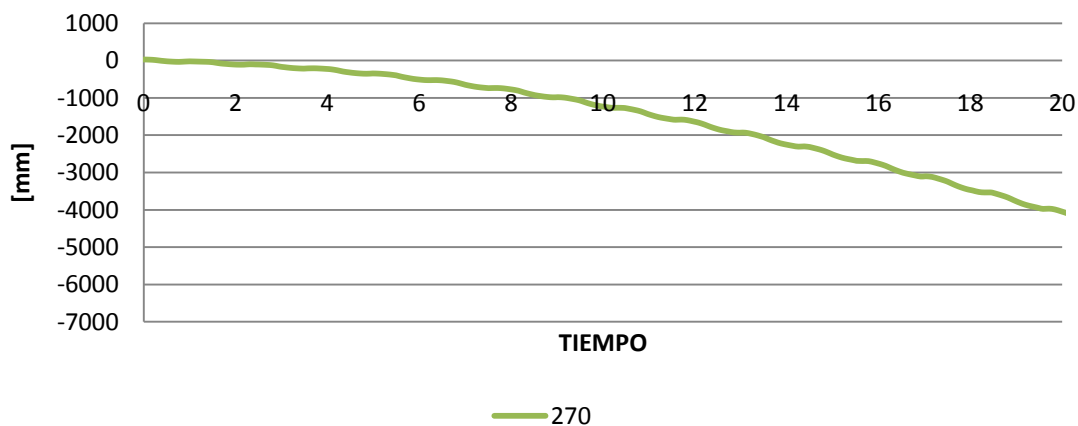


IMAGEN 5.6.

La inclinación es clara y continua, una curva sin apenas rectificaciones. Parte de la posición inicial y con esta velocidad de giro se va a la derecha. Por tanto, si lo que buscamos es que el Pasibot tome una curva hacia el lado derecho de la superficie por la cual se desplaza, esta velocidad nos permitiría conseguirlo.

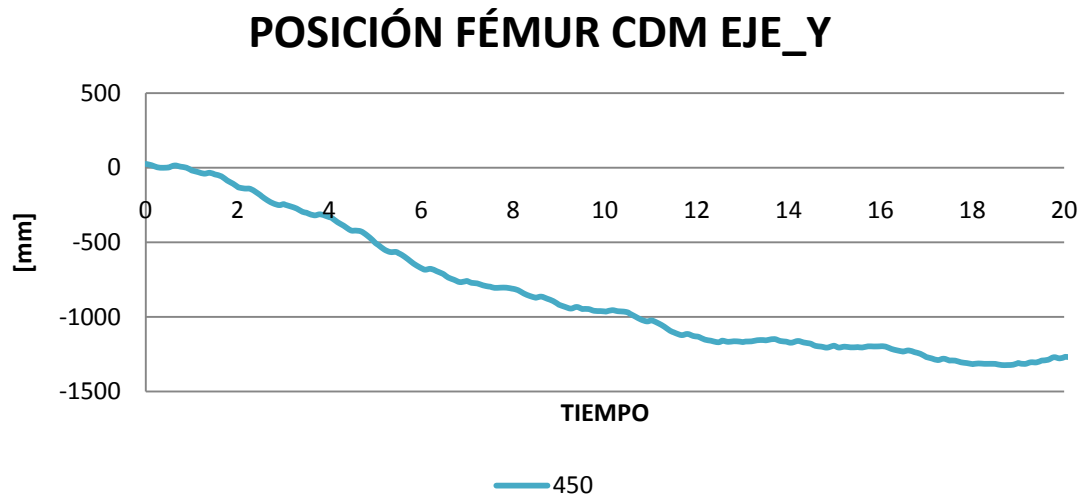


IMAGEN 5.7.

Para los 450° se aprecia cómo va hacia el lado izquierdo, negativo en la gráfica, y luego va haciendo el intento de retornar a la recta inicial de desplazamiento. Es posible que con una simulación más larga se consiga sacar la curva exacta hasta que vuelva a la recta inicial. Esta velocidad nos podría aportar el recurso de rodear un objeto determinado para poder luego volver a nuestra vía.

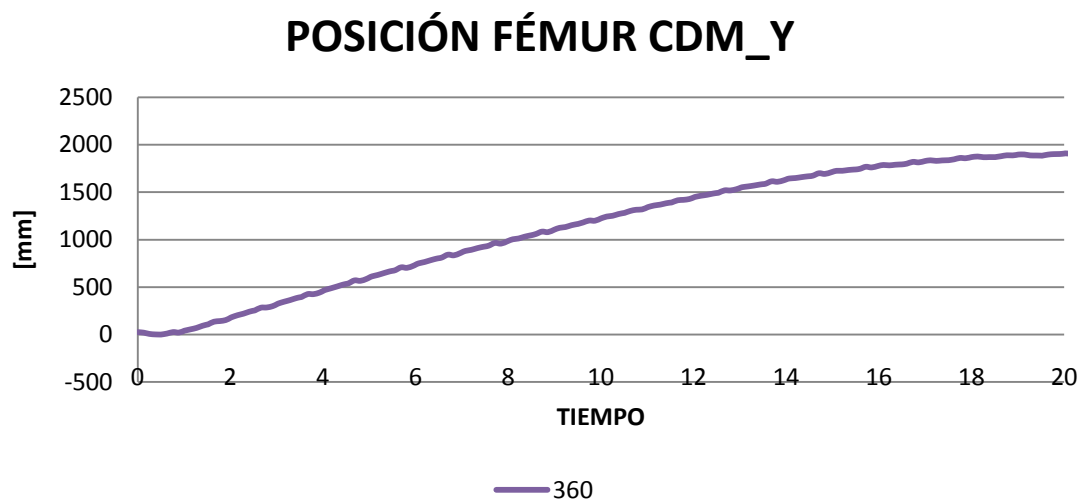
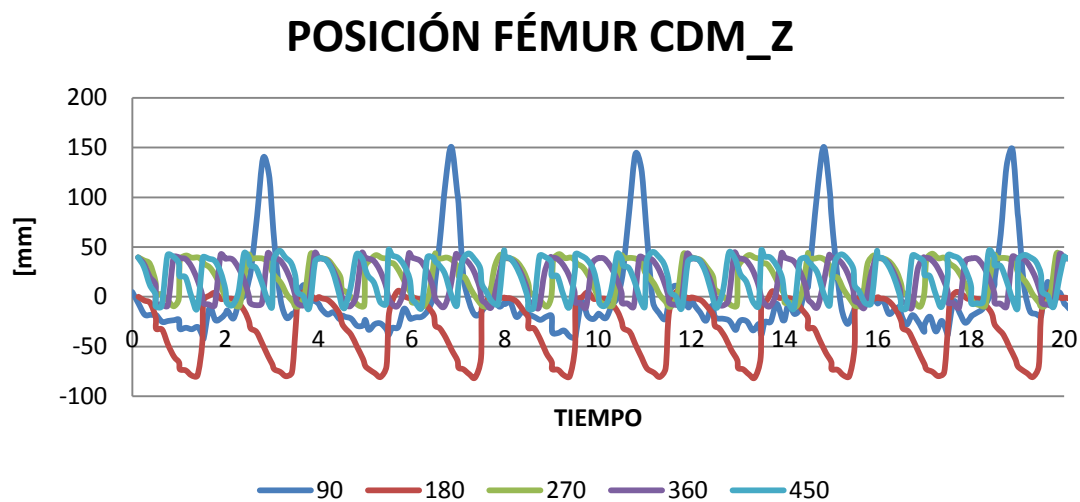


IMAGEN 5.8.

Por último, el caso de la velocidad de  $360^\circ$  es totalmente distinto al resto. En su forma se parece mucho a la curva de  $270^\circ$  pero invertida. La peculiaridad de esta gráfica es que es la única con desplazamiento positivo, es decir, con giro hacia la izquierda.



**IMAGEN 5.9.**

El eje Z es el que mide el plano vertical, debido a esto, podemos apreciar en la gráfica que es cíclico. Indica la altura que sube el pie izquierdo el robot, en este caso la medida es tomada desde el cdm del fémur. Si nos fijamos bien, veremos valores negativos. No tiene demasiado sentido que el fémur tenga valores por debajo de cero, esto se debe a la inclinación de la rodilla y por tanto, de todos los elementos ligados a ella. Es decir, cuando va a apoyar se flexiona la rodilla, y como se mide desde el cdm del fémur, este se por debajo de su posición inicial y pasa a valores negativos. Lo que tiene algo menos de coherencia son las variaciones tan grandes en la posición con respecto a la velocidad aplicada.

### POSICIÓN FÉMUR CDM EJE\_Z

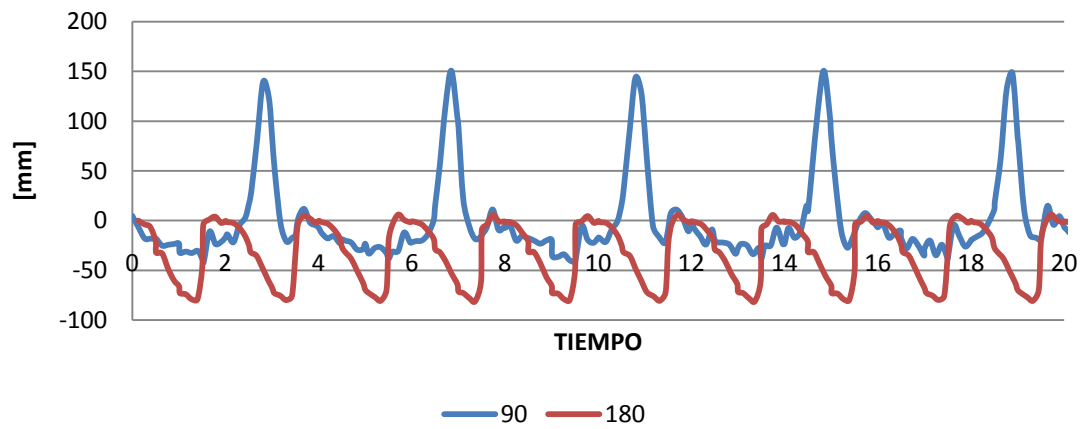


IMAGEN 5.10.

### POSICIÓN FÉMUR CDM EJE\_Z

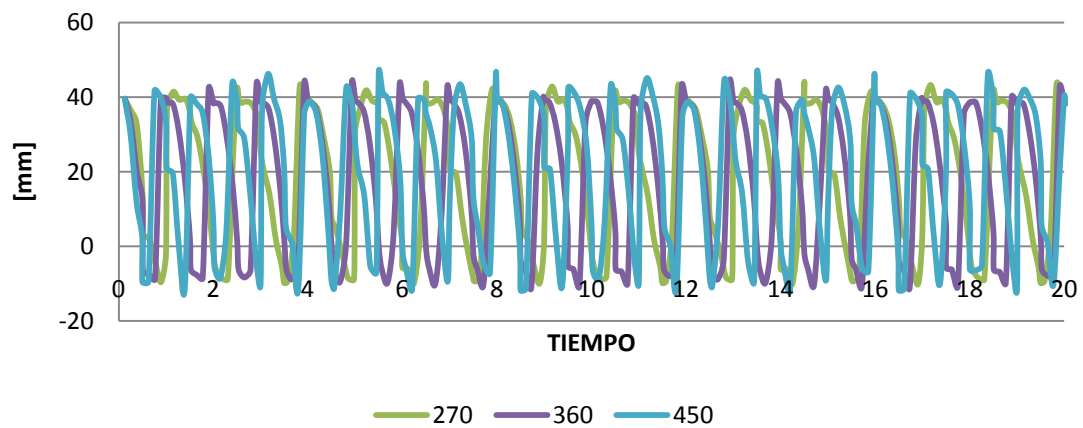


IMAGEN 5.10a.

Viendo el gráfico inmediatamente superior, se puede apreciar que superados los 270° los valores se estabilizan. Son cíclicos y además se mantienen en el mismo rango con máximos rondando los 40 mm.



### POSICIÓN FÉMUR CDM EJE\_Z

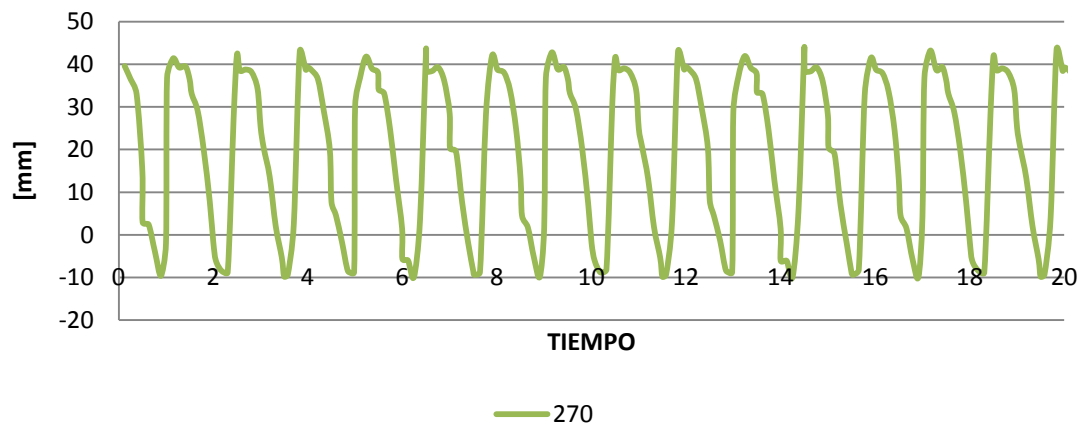


IMAGEN 5.11.

### POSICIÓN FÉMUR CM EJE Z

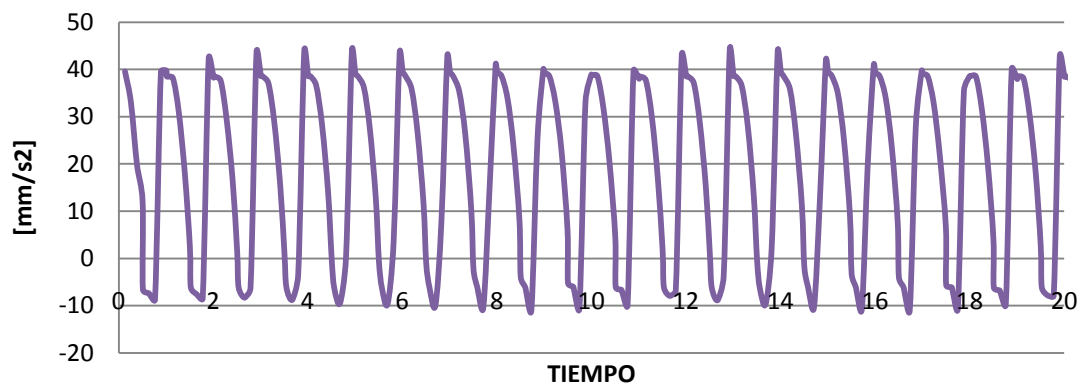
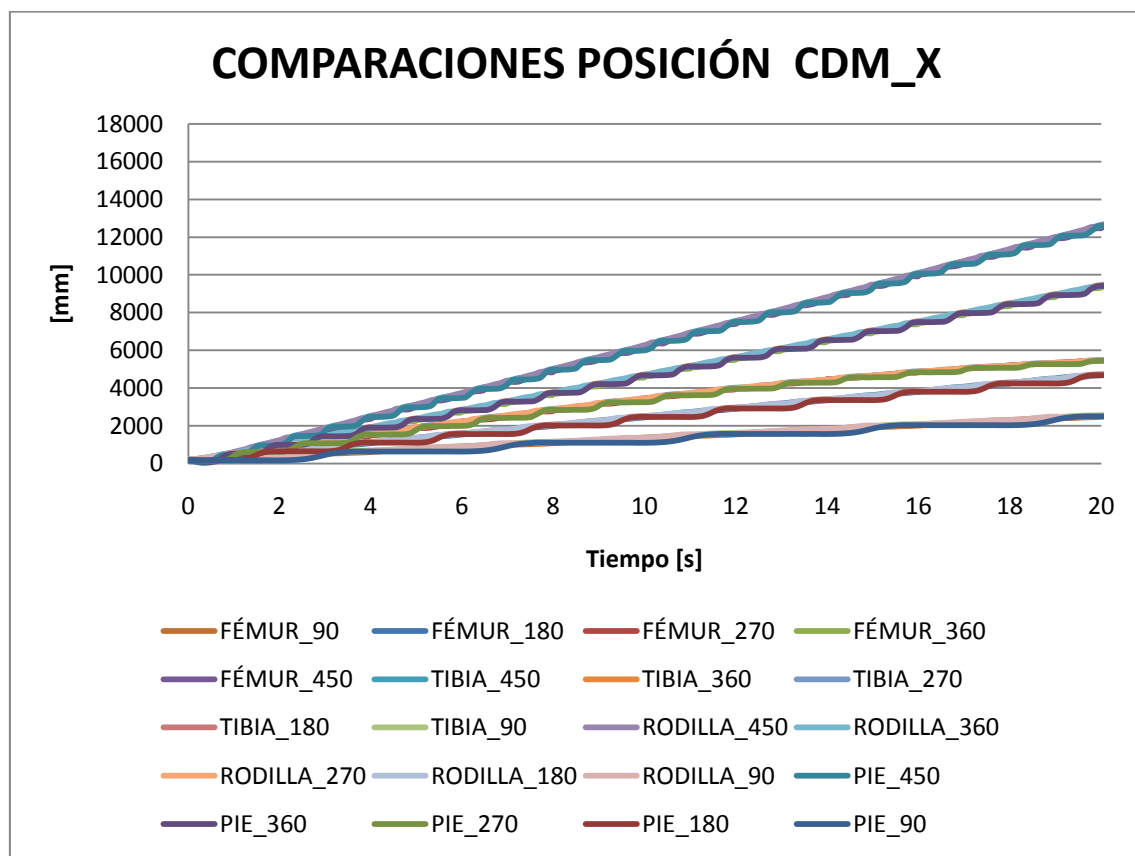


IMAGEN 5.12.

## **5.2. COMPARACIONES POR EJES DE LA POSICIÓN DE LOS CENTROS DE MASA**

Debido a que los elementos, en cuanto a la posición de sus centros de masas, todos relacionados con la misma pierna, las trayectorias y posiciones son muy similares, procederemos a realizar un análisis conjunto de todas las gráficas de la posición del centro de masas. Una vez realizado el análisis más detallado para el fémur se puede extrapolar de manera casi idéntica para el resto de elementos.

### **EJE X**



**IMAGEN 5.13.**

## COMPARACIONES POSICIÓN CDM\_X

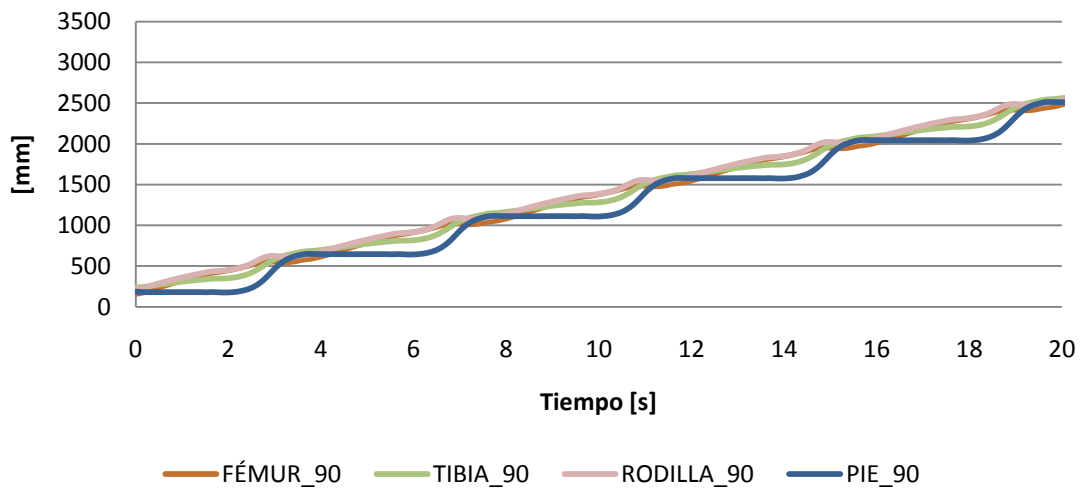


IMAGEN 5.14.

## COMPARACIONES POSICIÓN CDM\_X

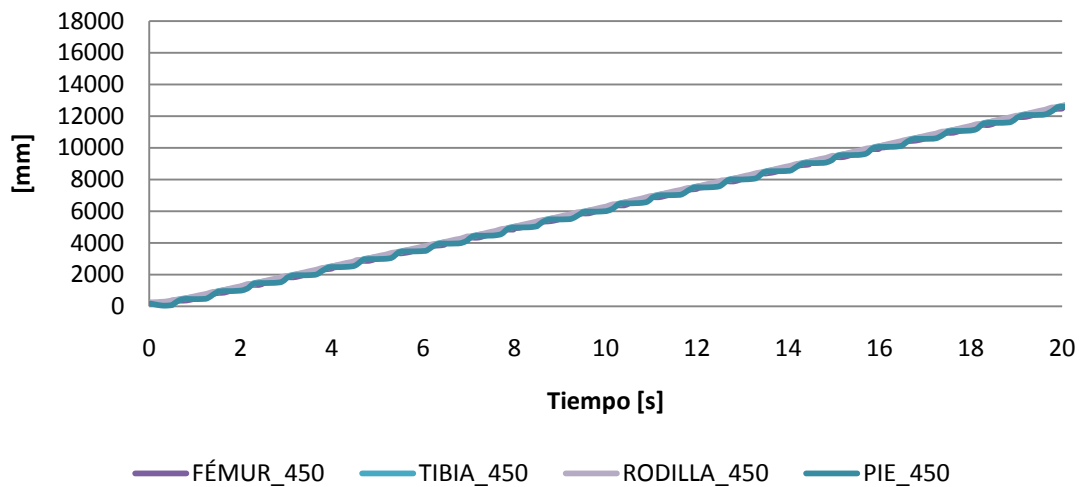
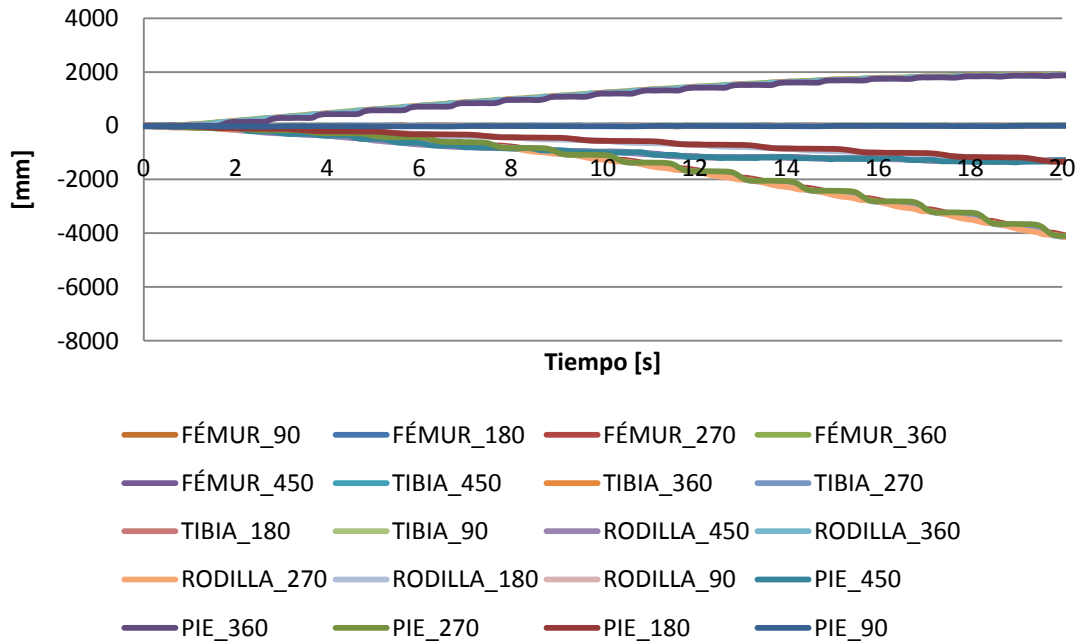


IMAGEN 5.15.

La posición de los distintos centros de masas de los elementos analizados, en lo que respecta al eje X, y también el eje Y que veremos más adelante, tienen un comportamiento muy similar. De hecho, en una determinada velocidad de giro, los desplazamientos de los centros de masas de los cuatro elementos son idénticos. No merece la pena analizar ningún elemento por separado ya que están todos en los mismos rangos de valor y se mueven acorde con el Robot, como es debido.

**EJE Y**

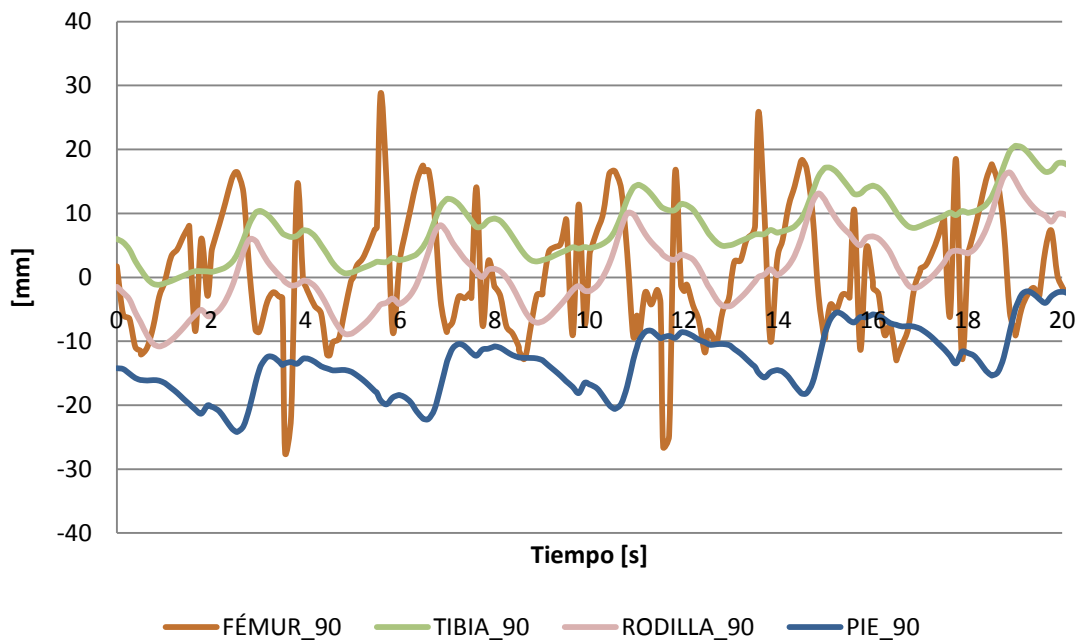
**COMPARACIONES POSICIÓN CDM\_Y**



**IMAGEN 5.16.**

En referencia a la posición de los centros de masas de los elementos analizados, si los sobreponemos todos en la misma gráfica podemos apreciar lo que se ve en la imagen de arriba. En otras palabras, la trayectoria sobre el eje Y para los cuatro elementos es casi idéntica. De hecho, en rasgos generales, los tiempos y las distancias desplazadas son iguales indiferente del elemento. Lo que varía es la trayectoria seguida según la velocidad aplicada. Al igual que se ha destacado en el análisis aislado del fémur, los elementos giran hacia un lado u otro según la velocidad aplicada. Por tanto, con 360° se gira para un lado y el resto gira para el otro, que es el derecho.

## COMPARACIONES POSICIÓN CDM\_Y



**IMAGEN 5.17.**

En cuanto al análisis genérico, hay que hacer hincapié en las gráficas que aparecen para los elementos en relación al velocidad de 90°. Resulta curioso que los valores oscilan entre cantidades positivas y cantidades de desplazamiento negativo. Si recordamos la explicación de la teoría del movimiento bípedo, este sería el caso más favorable para el robot. En otras palabras, cuando la velocidad de giro se pone a 90°, el desplazamiento de los elementos fuera de la trayectoria es poco. En realidad, los valores oscilan entre -30mm y 30mm. Este rango, que en valor absoluto es de 60mm, está únicamente 10mm por encima de la oscilación natural de un ser humano a la hora de caminar siguiendo una trayectoria recta y predeterminada. Lo curioso resulta en que ningún elemento por sí solo supera este rango de 50mm, sino que se abarca seleccionando los máximos. Como conclusión, en cuanto a los desplazamientos de los centros de gravedad de los elementos, estas oscilaciones indican que la acción de la marcha es la correcta.

## COMPARACIONES POSICIÓN CDM\_Y

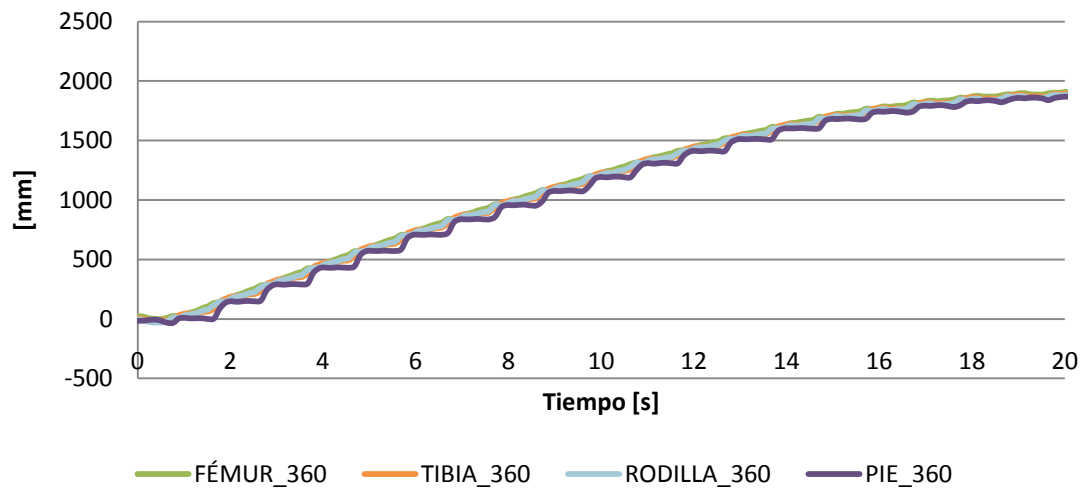


IMAGEN 5.18.

En la imagen superior se aprecia el desplazamiento de los CDM sobre el eje Y en sentido positivo. En contraposición esta la grafica inferior que se desplaza hacia los valores negativos. Ambas tienen una trayectoria continuada en el desplazamiento al lado en cuestión, y en ningún momento hace un giro como para volver a su centro de trayectoria inicial.

## COMPARACIONES POSICIÓN CDM\_Y

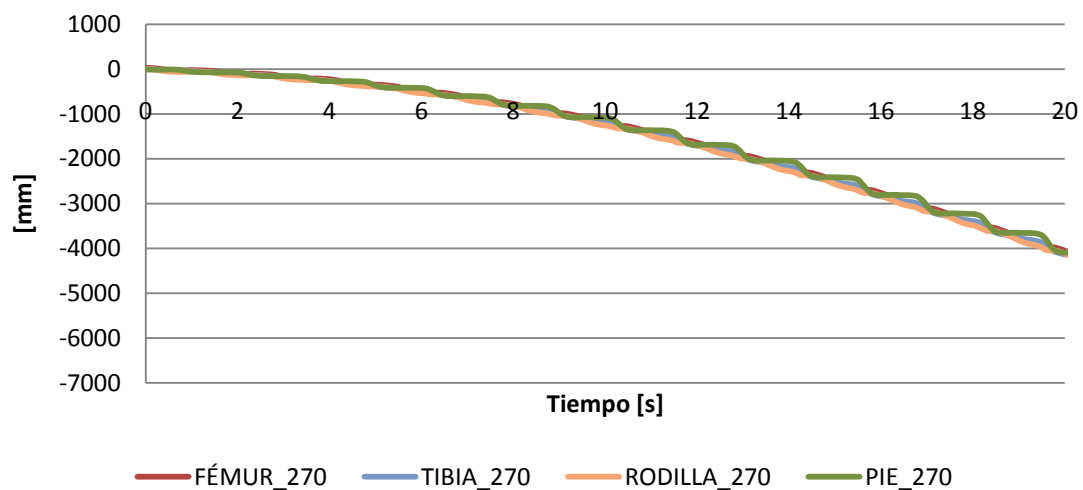
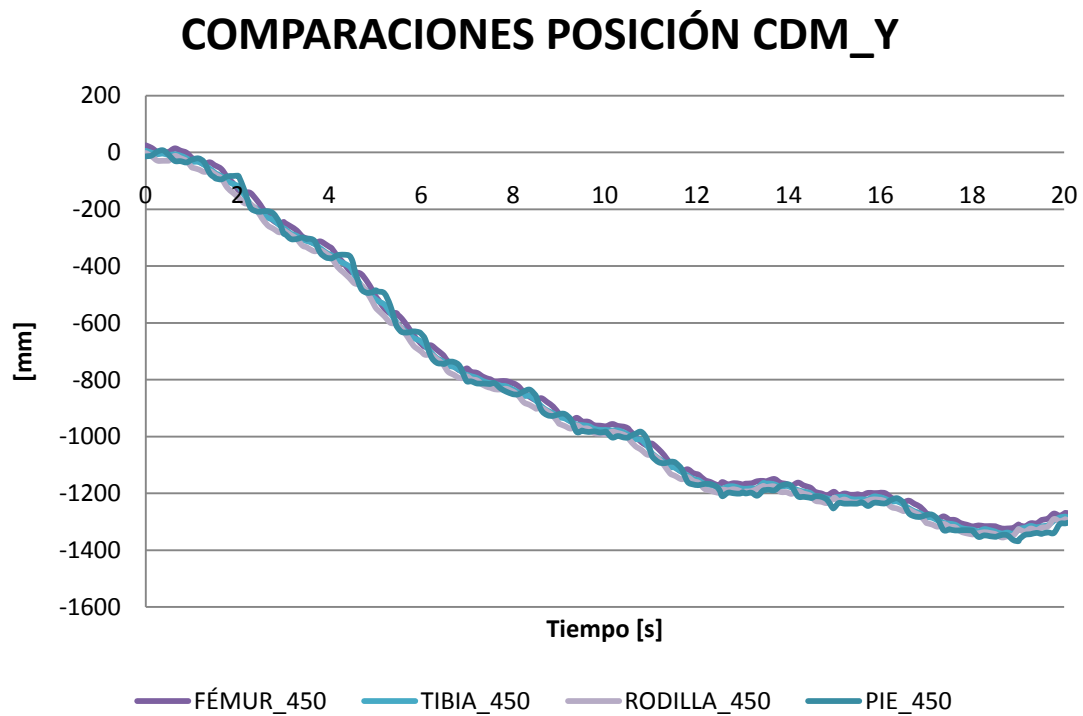


IMAGEN 5.19.

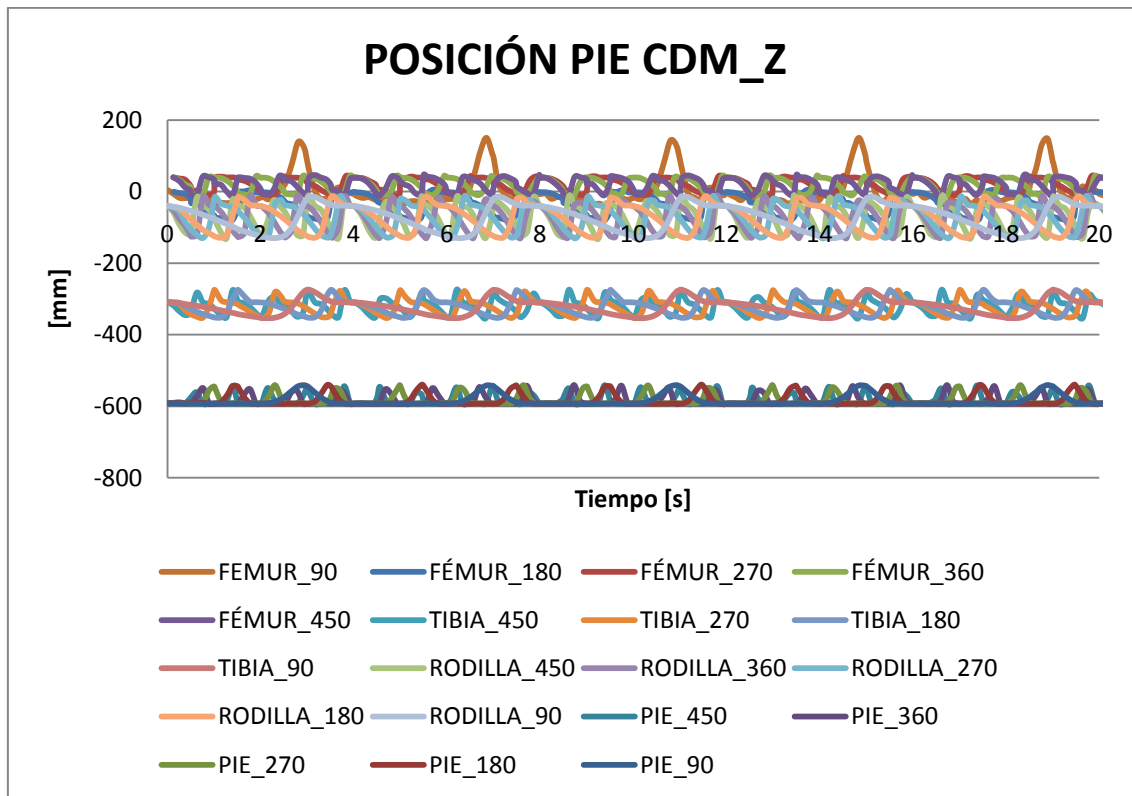


**IMAGEN 5.20.**

Por ultimo, se puede apreciar en la grafica con una velocidad de giro de 450 grados segundo, que la trayectoria tiene un carácter claro de descenso en el eje vertical, pero cuando se acerca al final va retomando la dirección para llegar volver a su línea de actuación. Esta simulación es insuficiente para ver si el recorrido vuelve o no a su línea de trayectoria inicial, pero simulando para valores mayores, quizás se puedan sortear obstáculos con una simple modificación en la velocidad de giro.

### EJE Z

La siguiente gráfica en cuestión tiene más intrínquilis que las anteriores de posición. Si nos fijamos en la gráfica de abajo, la de la posición de los centros de masas con respecto a la vertical, podemos ver muchas diferencias con el resto.

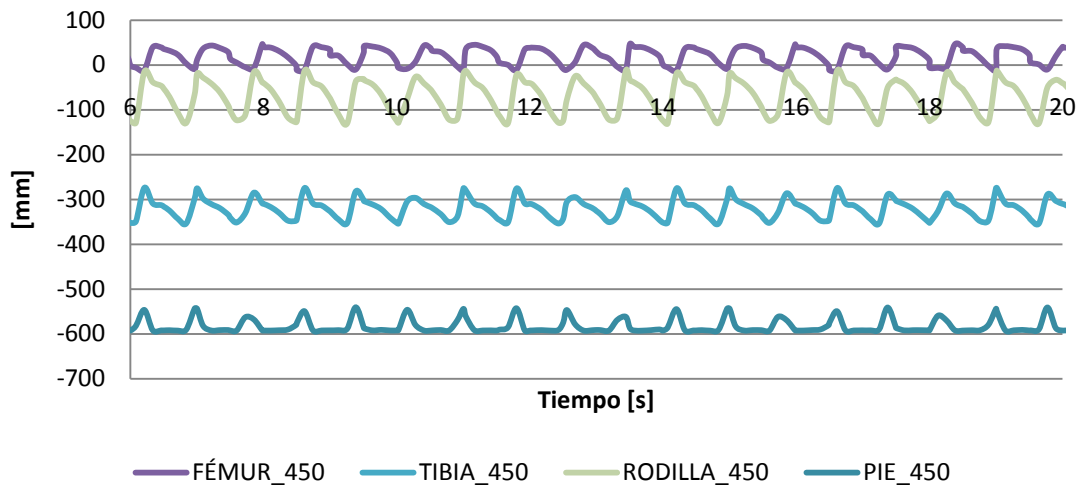


**IMAGEN 5.21.**

Las diferencias que se pueden apreciar se deben a que este plano es el vertical, es el que marca lo que sube cada elemento. Si nos fijamos bien, los elementos a comparar tienen todos distintos rangos de desplazamientos. De hecho, los únicos que se parecen son los del fémur y la rodilla. Esta diferencia de rangos tiene que ver con la posición de los centros de masa de cada elemento. Por ejemplo, la rodilla se encuentra por encima del pie, por tanto, aunque se mueve en el mismo rango de valores que el pie, los valores son distintos, y por tanto, es esa la razón por la que se puede apreciar esta división en la gráfica con relación a cada elemento. El único caso destacable para hacer un análisis más profundo es el caso del fémur para las velocidades de 90° y 180°, cuestión que se ha realizado en el análisis inicial del fémur.



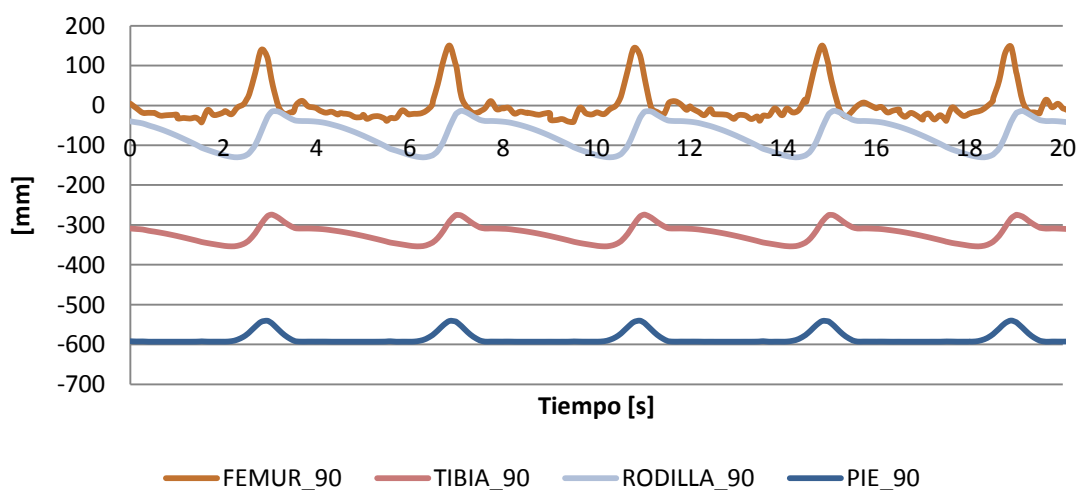
### POSICIÓN PIE CDM\_Z



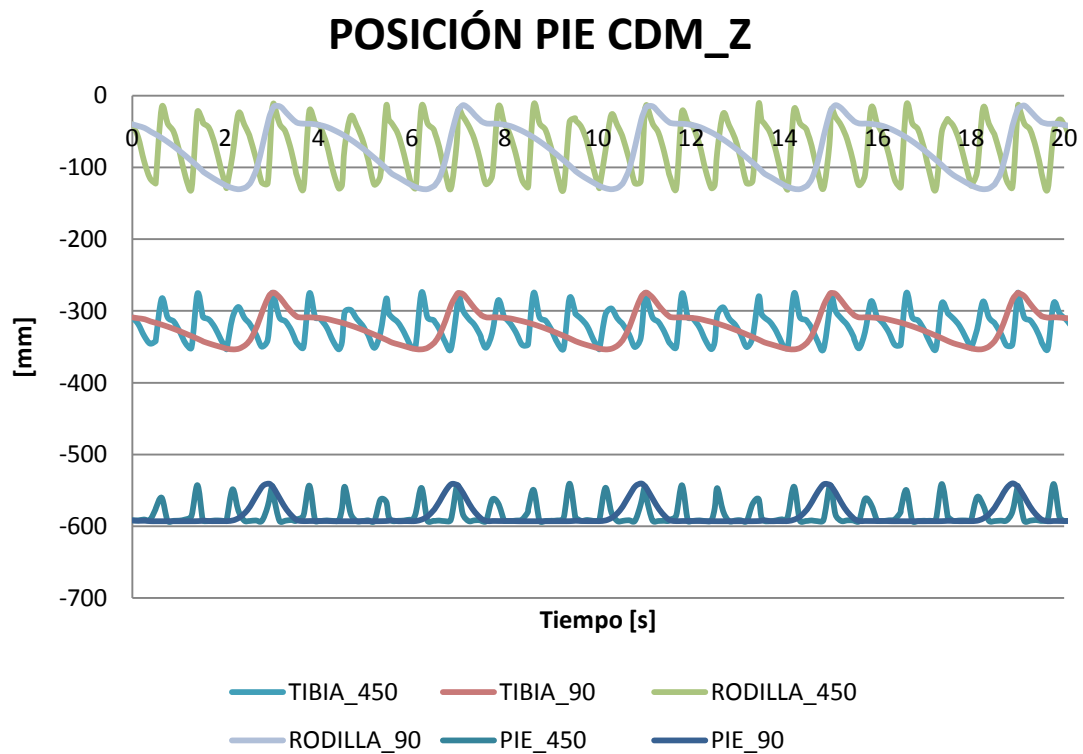
**IMAGEN 5.22.**

Las dos gráficas aquí vistas, tanto la de encima de estas líneas como la de abajo, hacen referencia a la posición de los CDM de los elementos en el eje Z. Se ha sacado el detalle de estas velocidades para que se pueda apreciar que los rangos de actuación son los mismos, los elementos también lo son, y lo único que varía son los pasos. Por último, la curva es totalmente cíclica, como debería ser, ya que los elementos suben y bajan siempre la misma cantidad en el proceso de la marcha.

### POSICIÓN PIE CDM\_Z



**IMAGEN 5.23.**



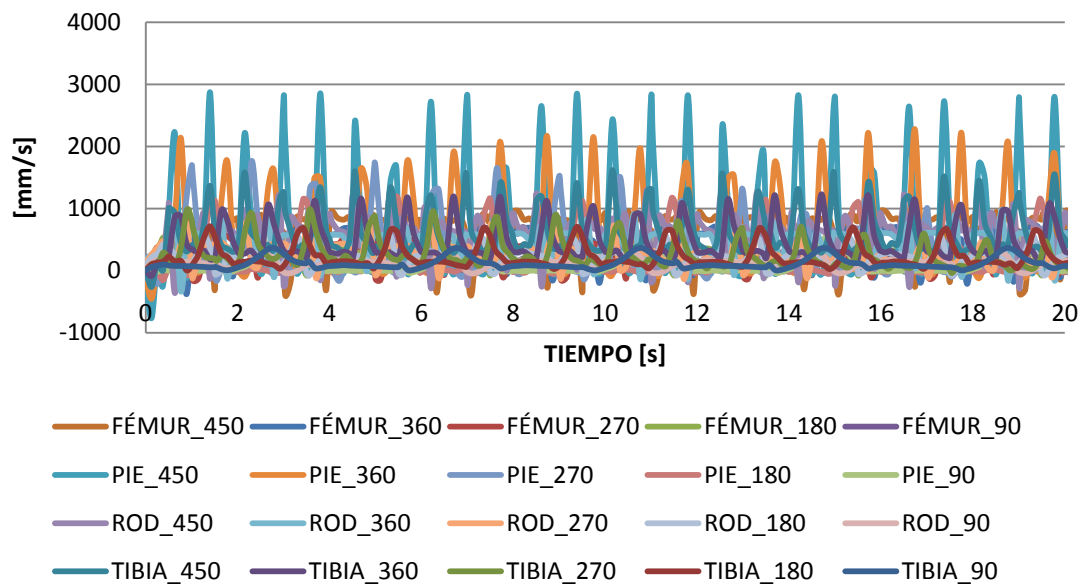
**IMAGEN 5.24.**

Una vez vistas las gráficas de 90°/s y 450°/s por separado para ver su forma, vemos una nueva gráfica en la que aparecen las dos velocidades superpuestas. Se notan tres divisiones, una para el pie, otra para la tibia y la última es la del fémur. Si nos fijamos bien, a mayor velocidad mayor número de pasos. De hecho, para 90°/s solo se dan 5 pasos cuando en el mismo tiempo, la velocidad de giro de 450°/s, se encarga de dar 25 pasos.

### 5.3. COMPARACIÓN DE LAS VELOCIDADES LINEALES DE LOS CM

#### EJE X

#### COMPARACIONES VELOCIDAD LINEAL CDM\_X



**IMAGEN 5.25.**

En la imagen superior, si nos fijamos con detalle es complicado distinguir los colores y las formas debido al cúmulo de funciones dentro de los mismos rangos. Esto se distancia de la posición, donde podíamos ver con claridad las distintas velocidades y a su vez ver que los valores eran aproximados para una determinada velocidad de giro.

En este caso, la proyección cíclica es muy similar, lo que varía son las magnitudes. ¿Por qué varían las magnitudes? Pues se debe a que la velocidad está directamente relacionada con el espacio y el tiempo, por tanto, a mayor espacio a cubrir, mayor velocidad adquirirá.

A continuación separaremos algunas gráficas dentro de este apartado para ver de manera más detallada como funcionan. Empezaremos por las gráficas generadas a una velocidad de giro de 90°. Seleccionamos esta velocidad angular debido a que es donde más claro se puede apreciar lo que nos interesa.

## COMPARACIONES VELOCIDAD LINEAL CDM\_X

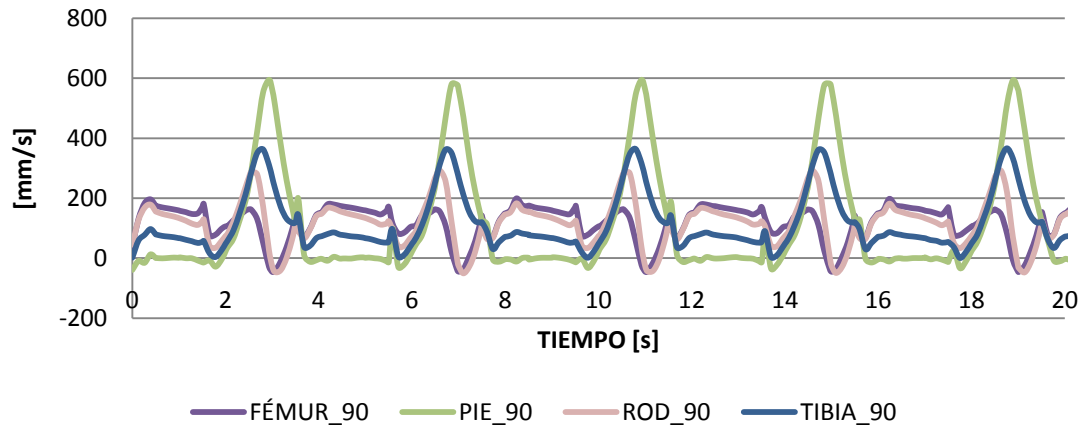


IMAGEN 5.26.

En la imagen inmediatamente superior, para un giro de 90°, vemos como los distintos elementos tienen velocidades distintas. Esto se debe a las trayectorias en el eje X de los centros de masas de cada elemento. Si nos fijamos bien, el color verde, el de mayor valor, es el que corresponde al centro de masas del pie. El pie, en el proceso de dar un paso, es el que mayor recorrido realiza, de hecho, la parte superior de su paso es semi-elíptica con una parte inferior plana, estos es, dentro del ciclo del paso. Debido a que el pie recorre más distancia, es el que más se acelera. Luego, los valores mayores son la tibia, el fémur y la rodilla. El fémur y la rodilla tienen una velocidad similar debido a la cercanía de sus centros de masa y que recorren espacios muy similares.

## COMPARACIONES VELOCIDAD LINEAL CDM\_X

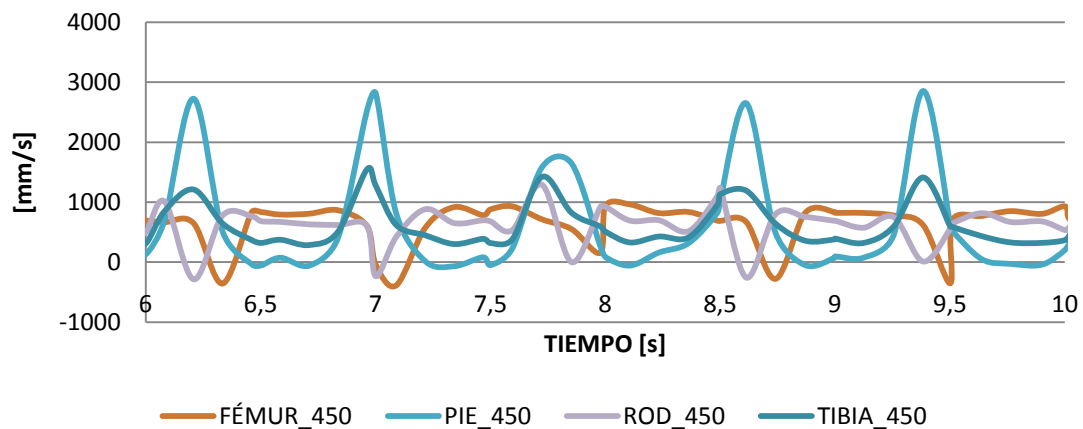
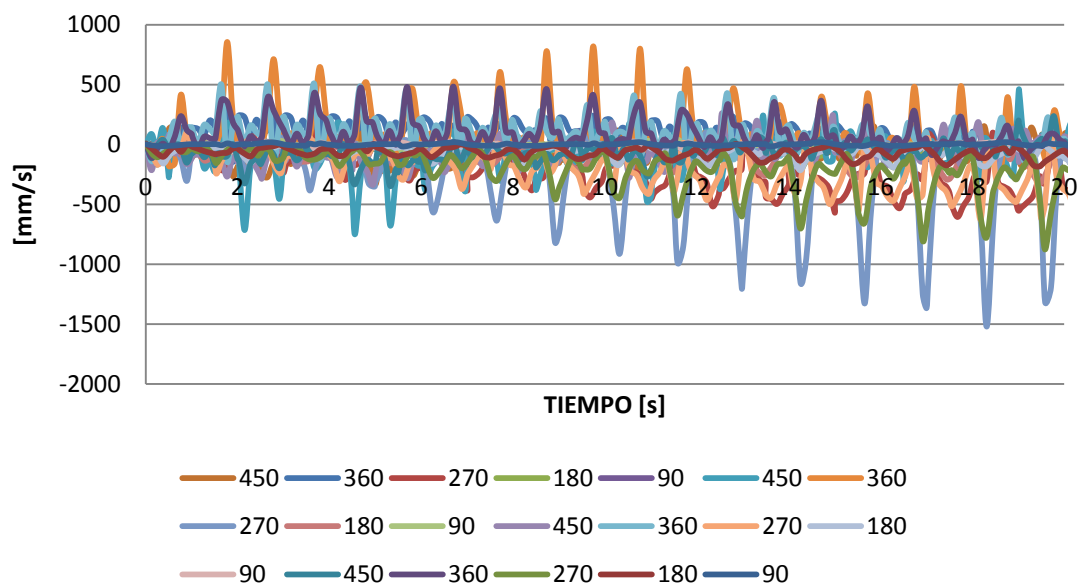


IMAGEN 5.27.

Para finalizar con las comparaciones sobre el eje x, vemos que si eliminamos el valor de las aceleraciones del centro de masas del pie, el resto de gráficas tienen formas muy parecidas. Esto se debe, al igual que hemos comentado en la gráfica de los 90°, a que son puntos muy próximos, y por tanto, que recorren distancias muy similares, siendo así similares sus velocidades.

### EJE Y

## COMPARACIONES VELOCIDAD LINEAL CDM\_Y



**IMAGEN 5.28.**

En lo referente a las velocidades lineales, el eje y es algo distinto de los otros dos. Recordemos que el eje Y es aquel que permite el movimiento de lado a lado, es decir, en horizontal. Lo que medirá en el proceso de la marcha de nuestro bípodo, será mayormente la cuantificación del balanceo en cada instante determinado. Como particularidades, vemos que hay parte de las gráficas que despuntan hacia arriba, es decir, valores positivos, y otra parte despuntando hacia abajo, que son valores negativos.

A continuación se analizarán las velocidades con más detalle para entender el porqué de este resultado gráfico.

## COMPARACIONES VELOCIDAD LINEAL CDM\_Y

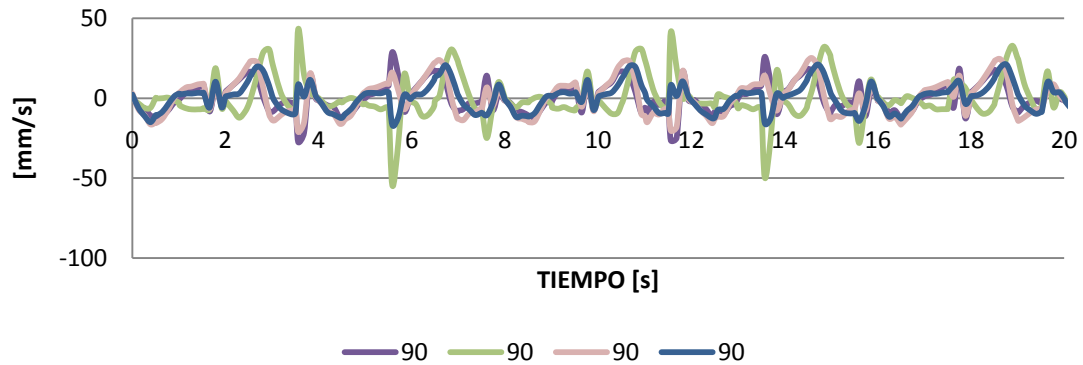


IMAGEN 5.29.

Ateniéndonos a los mismos criterios que en el caso del desplazamiento de los centros de masas, vemos que los valores de la velocidad lineal de los elementos oscilan entre valores positivos y negativos muy próximos al eje. La marcha es muy próxima a la trayectoria recta deseada pero hay balanceo. Nuevamente es el pie el que tiene valores mayores y nuevamente es por la distancia recorrida. Aunque en este caso los desplazamientos son laterales, los pies, si hay una pequeña desviación en la parte superior de nuestro bípodo, al estar más lejos, un pequeño desplazamiento angular reflejará un desplazamiento mayor en el pie debido a la distancia.

## COMPARACIONES VELOCIDAD LINEAL CDM\_Y

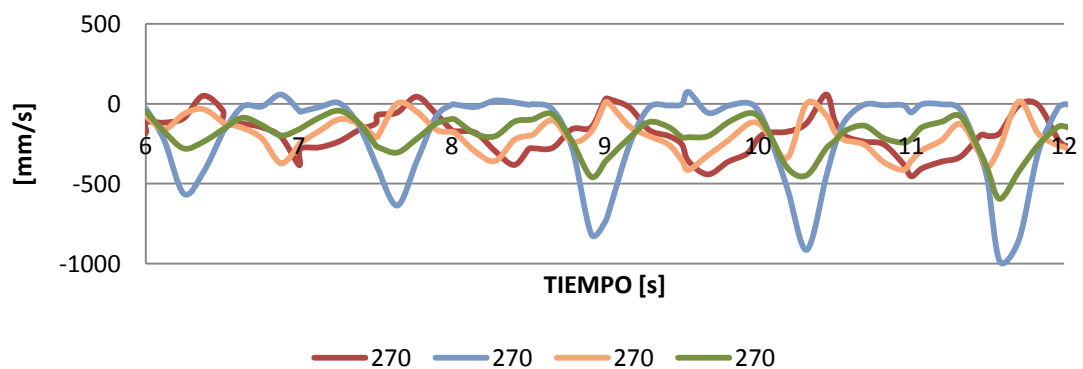
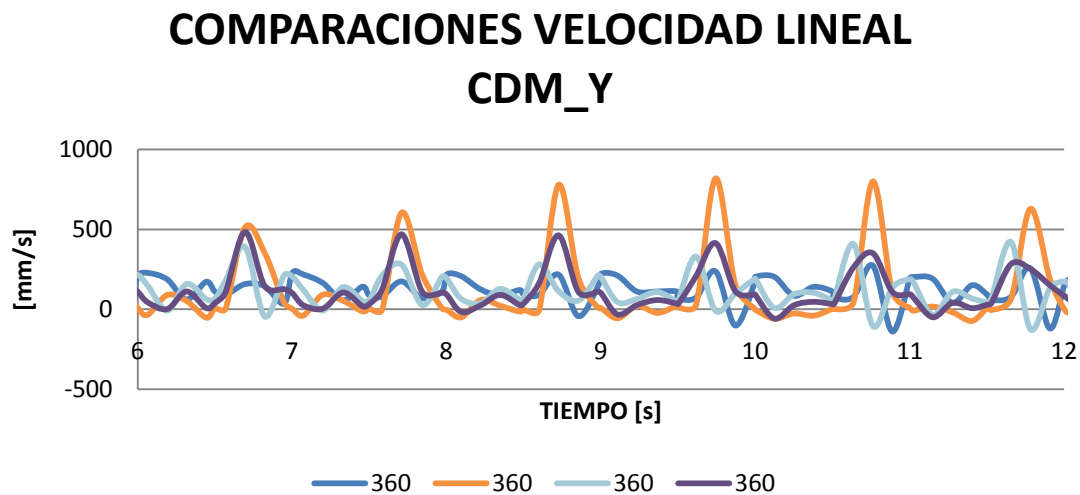


IMAGEN 5.30.

Tanto para la gráfica que se ve, de 270° de giro, como la de 180° de giro, los resultados son muy similares. El desplazamiento del bípodo es hacia el lado derecho, el

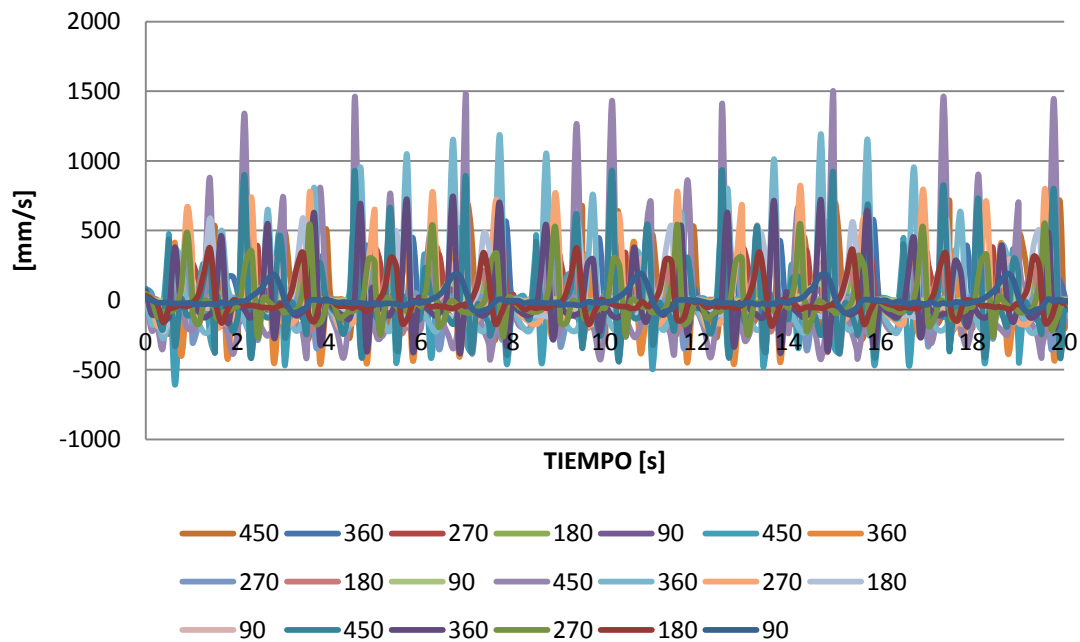
sentido negativo del eje Y, siendo por eso negativos los valores de la velocidad. La gráfica indica que los elementos tienen velocidad hacia el lado derecho, y como es correcto, mide también el número de pasos realizados por el bípodo, coincidiendo con las gráficas de posición. Como conclusión vemos que hay una tendencia a que vaya aumentando la velocidad en el recorrido.



**IMAGEN 5.31.**

Para concluir con las velocidades en el eje Y, es necesario ver la gráfica en particular de los picos positivos. La pregunta debería ser ¿por qué para unas velocidades es positiva y otras negativas? Esto se debe al desplazamiento adoptado por el robot según la velocidad de giro aplicada. En el caso de los 360°, a diferencia del resto de valores, en el tiempo estipulado de 20s, el bípodo se desplaza hacia el lado opuesto que en el resto de casos. Siendo el desplazamiento hacia la izquierda de nuestro tablón las velocidades deben ser positivas. Nuevamente se puede apreciar como es el pie el elemento con mayor velocidad, seguido por la tibia y acabando por fémur y rodilla con velocidades muy similares.

## VELOCIDAD LINEAL CDM\_Z



**IMAGEN 5.32.**

El análisis de las gráficas en el eje Z son quizás las más sencillas a la hora de analizar una marcha bípoda. Consiste en ver la cantidad de veces que sube y baja un elemento con relación al desplazamiento. Por tanto, cada pico de las gráficas señala el punto de máxima altura de nuestro elemento. El descenso del pico es la parte final del paso. Por último, debe haber una zona plana, dicha zona es la del apoyo. Veremos las gráficas de 90° y de 450° para ver las diferencias en cuanto a la relación de pasos y aumento de valores de velocidad con relación a la velocidad de giro.



## COMPARACIONES VELOCIDAD LINEAL CDM\_Z

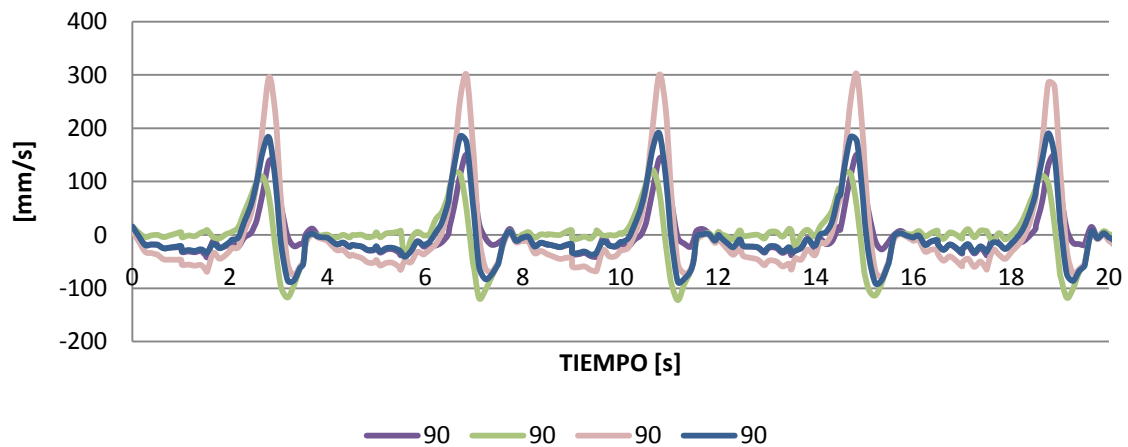


IMAGEN 5.33.

En la gráfica de arriba, correspondiente a los 90° de giro, se puede apreciar que existen cinco picos, por tanto, cinco pasos en nuestro proceso. En este caso, el elemento más acelerado es el rosa, es decir, la rodilla, siendo el que menos velocidad en la vertical recibe el pie. La peculiaridad que podemos destacar es la que se aprecia en el espacio entre picos. Dicho espacio debiera ser totalmente plano ya que consiste en la fase de apoyo de nuestros elementos. De hecho, si se mira el pie por sí solo, se verá que es este el que menos plano tiene su recorrido. Esto se debe a que el robot no es todo lo estable que debería ser, debido a esto, en el proceso de balanceo de la pierna contraria, nuestra pierna de estudio también se ve afectada. Claro, esto no afecta en gran medida, lo único que nos reseña es que en un momento en el que debería tener velocidad nula, la pierna izquierda tiene una pequeña oscilación.

## COMPARACIONES VELOCIDAD LINEAL CDM\_Z

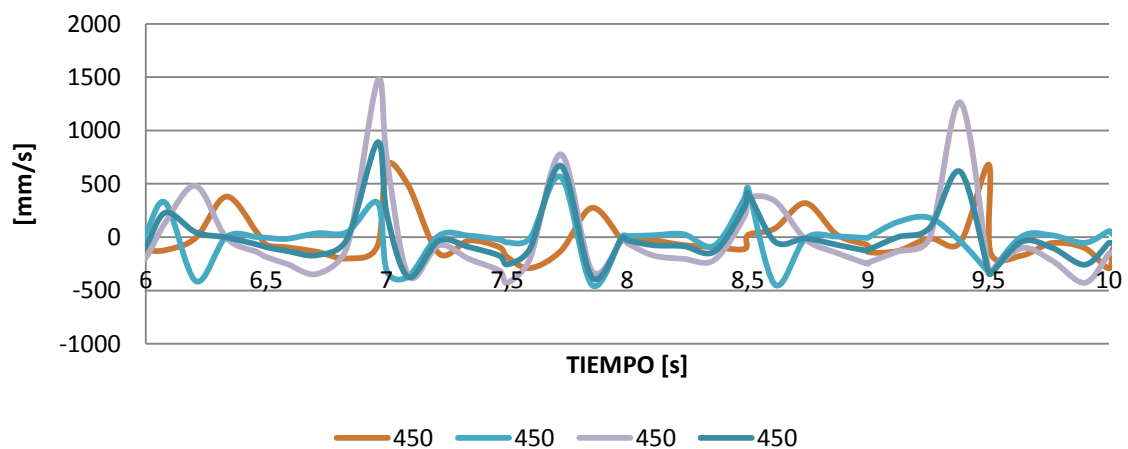


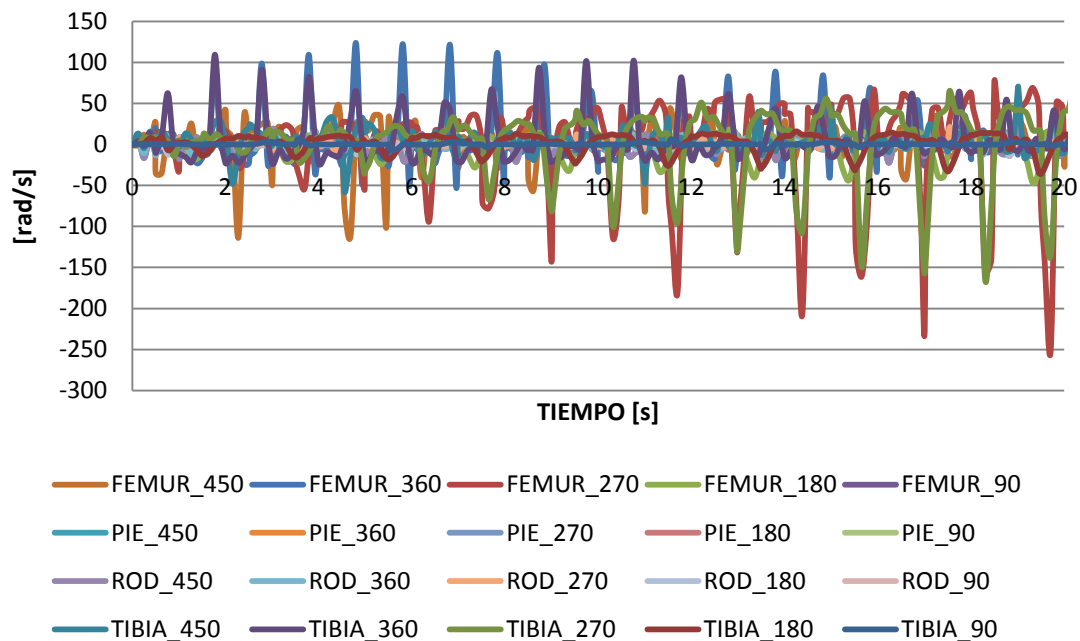
IMAGEN 5.34.

Por último, analizaremos el otro extremo, el de mayor velocidad de giro. Si nos fijamos únicamente en los rangos del eje de abscisas, vemos que los valores contemplados en esta gráfica son mucho mayores. Esto es lógico ya que al tener mayor velocidad de giro, el bípedo se desplaza más rápidamente, por tanto, sus velocidades en el desplazamiento serán mayores y habrá picos de mayor valor señalando los pasos. Los picos, también serán más cuantiosos debido al número de pasos.

### **5.3. COMPARACIONES DE LAS ACELERACIONES LINEALES DE LOS CM**

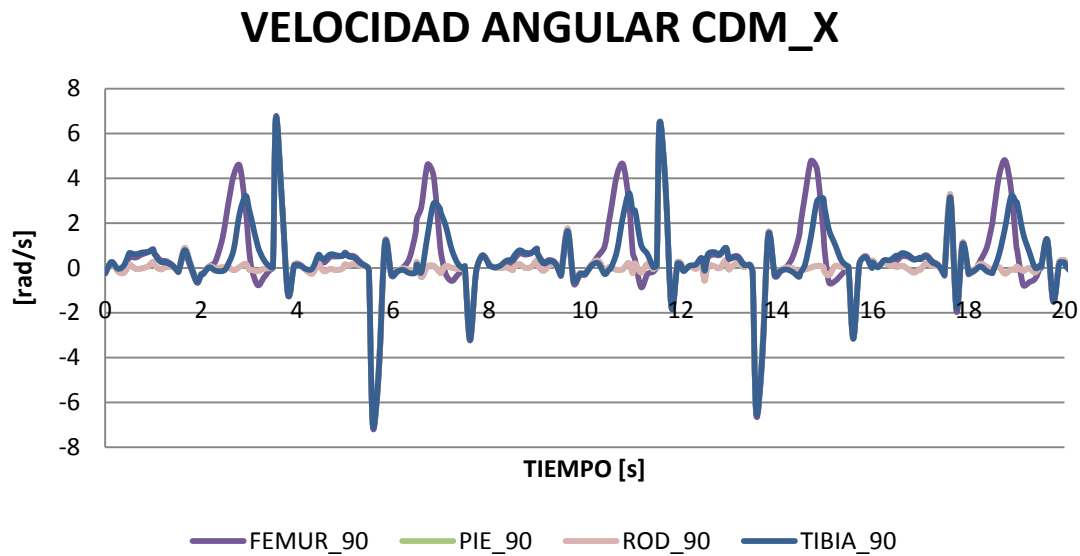
#### **EJE X**

#### **VELOCIDAD ANGULAR CDM\_X**



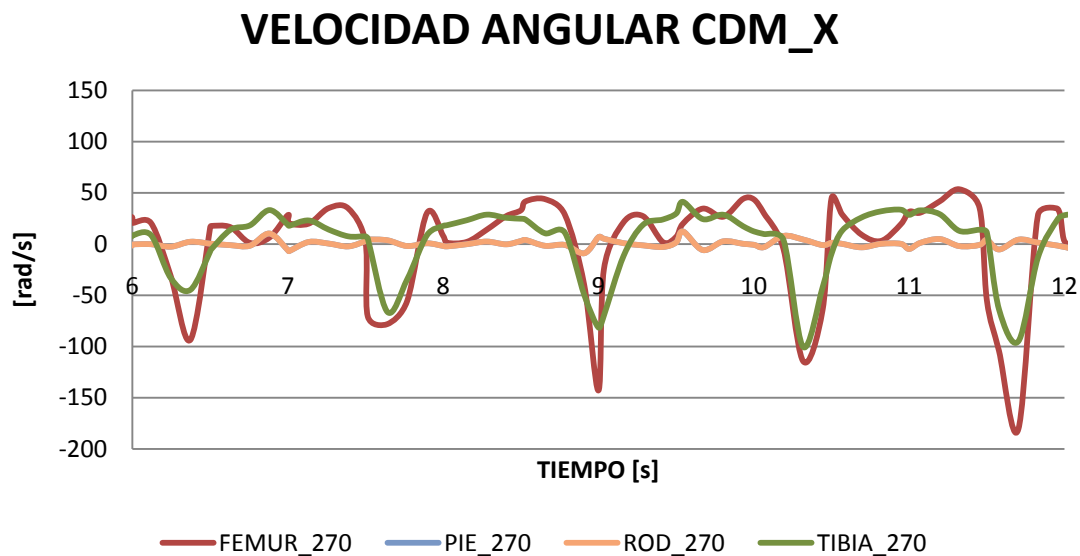
**IMAGEN 5.35.**

La velocidad angular es aquella que determina la velocidad con la que giran ciertos puntos dentro de un plano determinado. En este caso, los puntos son los centros de masa y los planos van variando según analizamos una u otra cuestión. Si nos fijamos con detenimiento, las gráficas halladas para la rodilla y el pie coinciden al 100%.



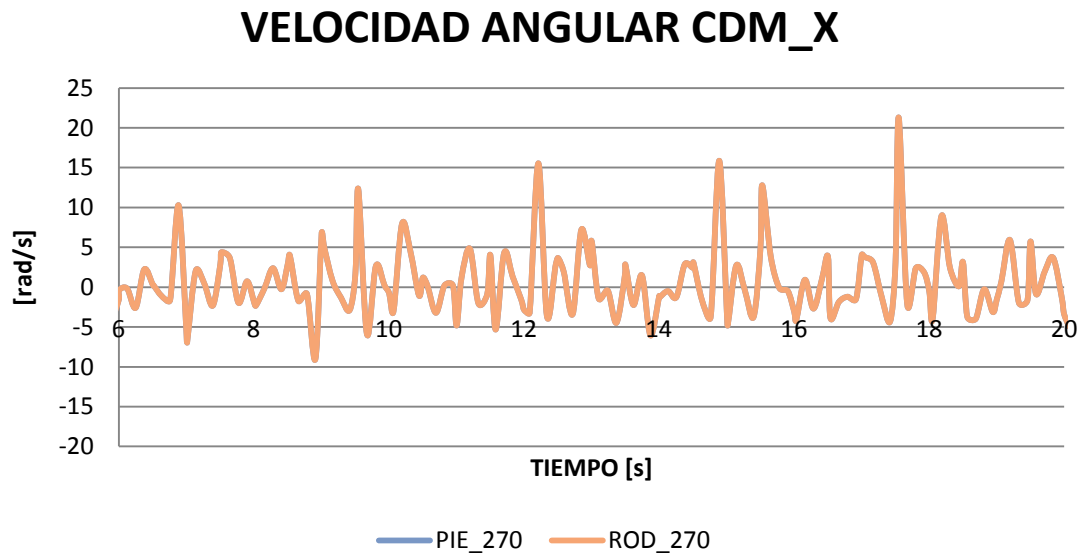
**IMAGEN 5.36**

Ateniéndonos a la gráfica para los valores de 90°, podemos ver que en este caso, todas las gráficas coinciden en los picos. Todas las gráficas cumplen el ciclo previsto y se solapan. Las gráficas del pie y la rodilla son exactamente iguales. Por otro lado, las gráficas de la tibia y el fémur tienen unos picos a diferencia del resto. Si lo comparamos con la posición de los elementos sobre el eje z, podemos ver que corresponden en el tiempo a los pasos realizados. En el punto donde se da el paso, la tibia y el fémur tienen una velocidad mayor a la del pie y la rodilla. Nuevamente, la oscilación entre valores positivos y negativos del mismo rango indica el balanceo del movimiento.



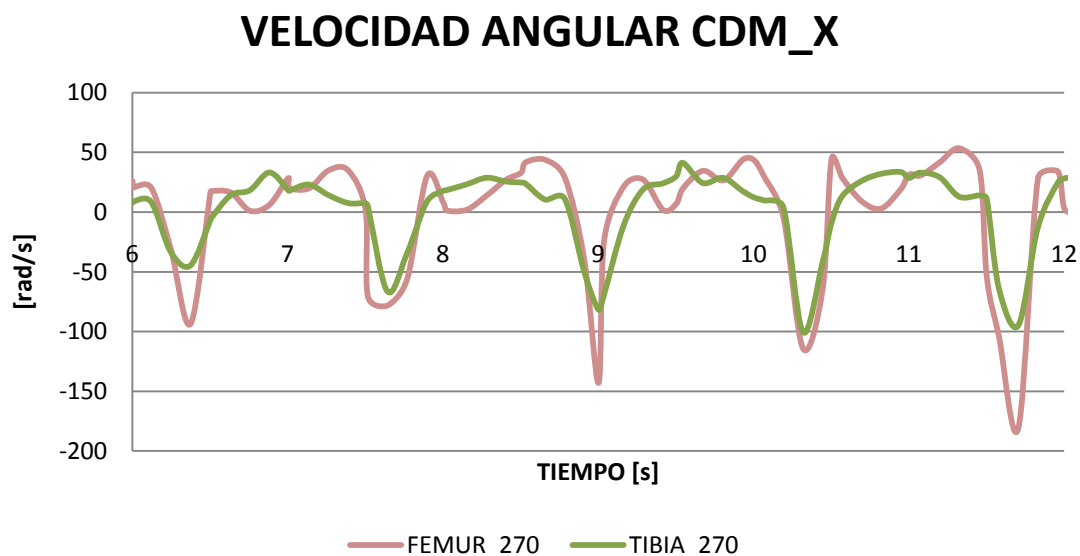
**IMAGEN 5.37.**

Si nos saltamos la gráfica de los 180°, que detalla lo mismo que esta pero con valores que se aprecian menos, vemos que no solo los valores de pie y rodilla son idénticos, sino que sus velocidades angulares son muy distintas a las de la tibia y el fémur. Para apreciarlo mejor veremos una gráfica abajo con la comparación dos a dos de los elementos antes mencionados.



**IMAGEN 5.38.**

Aquí vemos los rangos del pie y de la rodilla y como a diferencia de la gráfica en la que se encuentran todos los elementos, tiene más picos, de hecho, picos en las mismas posiciones que el resto de elementos.



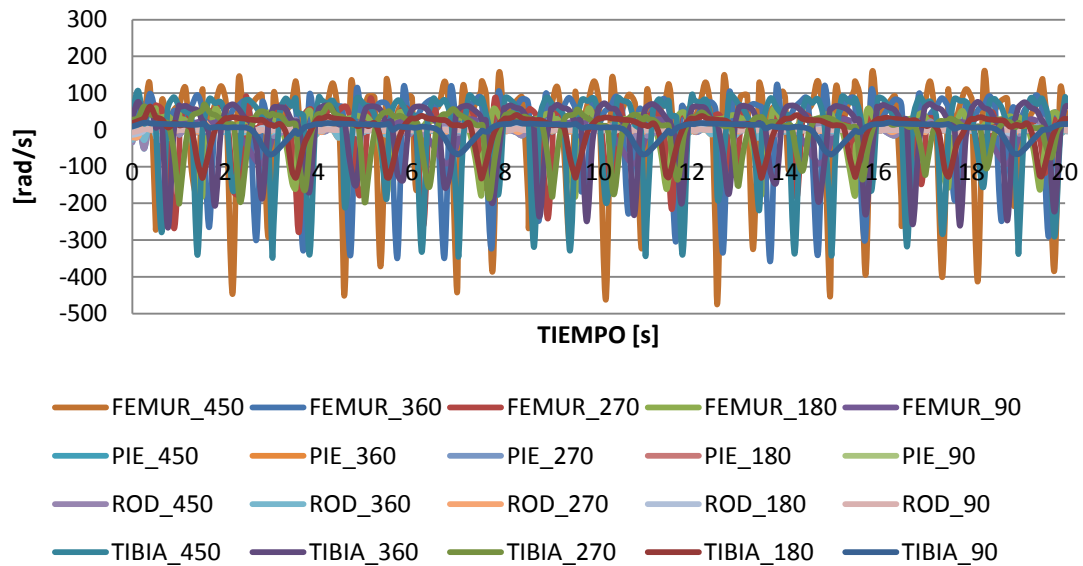
**IMAGEN 5.39.**

Viendo los elementos separados podemos apreciar de manera más objetiva la diferencia en los rangos de velocidades. Mientras en la primera gráfica del pie y la rodilla estamos entre los 20 [rad/s] y los -10 [rad/s], en la gráfica del fémur y la tibia tenemos un rango de datos que varía entre 100 [rad/s] y -250 [rad/s], cifra considerablemente mayor.

En definitiva, todas las gráficas de los elementos relacionados con la velocidad angular en X representan las mismas características. En el giro de 360° se vuelve a cambiar el signo de los valores debido a que nuestro bípedo gira en lado opuesto al resto de velocidades, y al aumentar a 450° los rangos de datos son mayores. Por tanto, como conclusión, podemos decir que la velocidad angular no influye de manera significativa en cuanto al pie y la rodilla se refiere, en cambio, si nos atenemos a la tibia y el fémur, los valores sí son significativos.

**EJE Y**

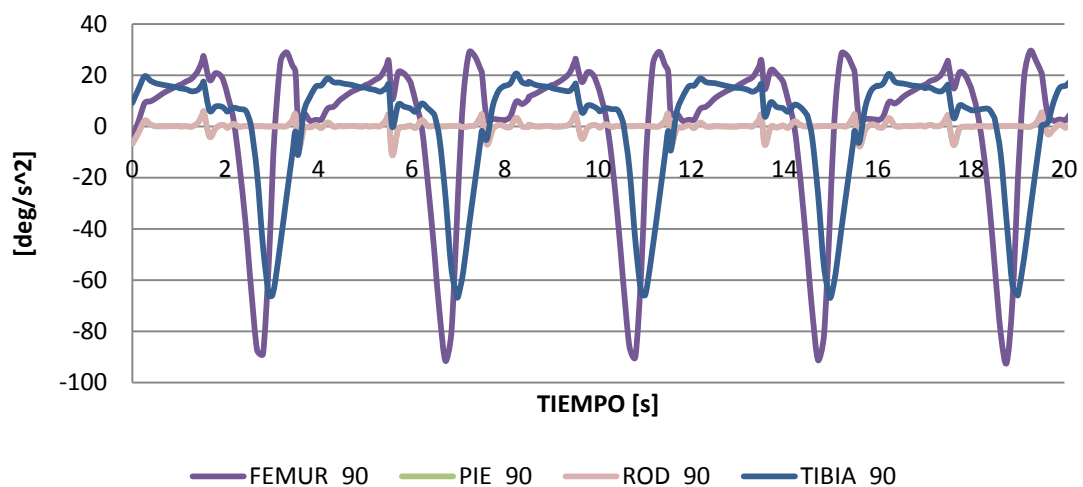
**VELOCIDAD ANGULAR CDM\_Y**



**IMAGEN 5.40.**

En referencia a la velocidad angular del eje Y hay poco que destacar. Vuelve a ocurrir que los valores de la rodilla y el pie son idénticos. Luego, los rangos de velocidad tienen variaciones al igual que en X y se van acelerando según aumenta la velocidad de la manivela.

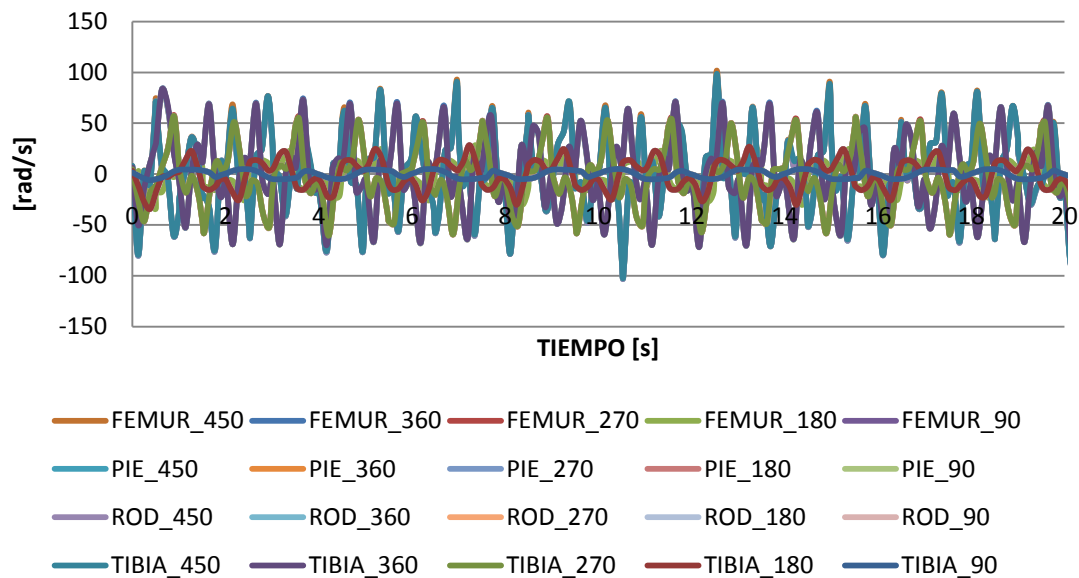
**VELOCIDAD ANGULAR CDM\_Y**



**IMAGEN 5.41.**

Con más detalle en la gráfica de los 90° de rotación de la manivela, podemos ver lo explicado anteriormente. La velocidad angular del fémur es la más grande, como ocurrirá con todas las gráficas, y la tibia, además de tener valores inferiores, está ligeramente desplazada en el tiempo.

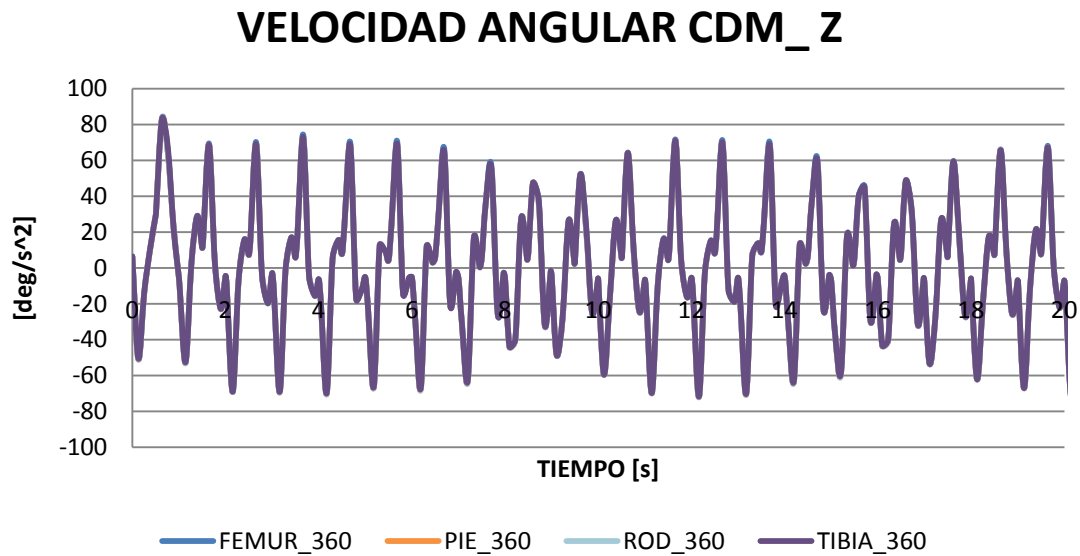
### VELOCIDAD ANGULAR CDM\_Z



**IMAGEN 5.42.**

El análisis de las velocidades angulares del eje Z son las más sencillas, como podemos ver en la gráfica general de todos los elementos y todas las velocidades, al igual que veremos en un extracto detallado de una única velocidad más abajo, todos los valores de la velocidad angular coinciden dentro de la misma velocidad de giro. Esto es sencillo de matizar, se debe a que el movimiento lo proporciona el motor en el centro, y este es el que hace que se mueva todo el robot, con un único grado de libertad. Por tanto, al igual que en otros ejes puede variar debido a pequeños giros en el proceso de la marcha, en el plano vertical, todos los elementos se mueven de manera conjunta, por tanto, sus velocidades angulares están directamente vinculadas tanto en forma como en valor y dependen únicamente de la velocidad de la manivela.





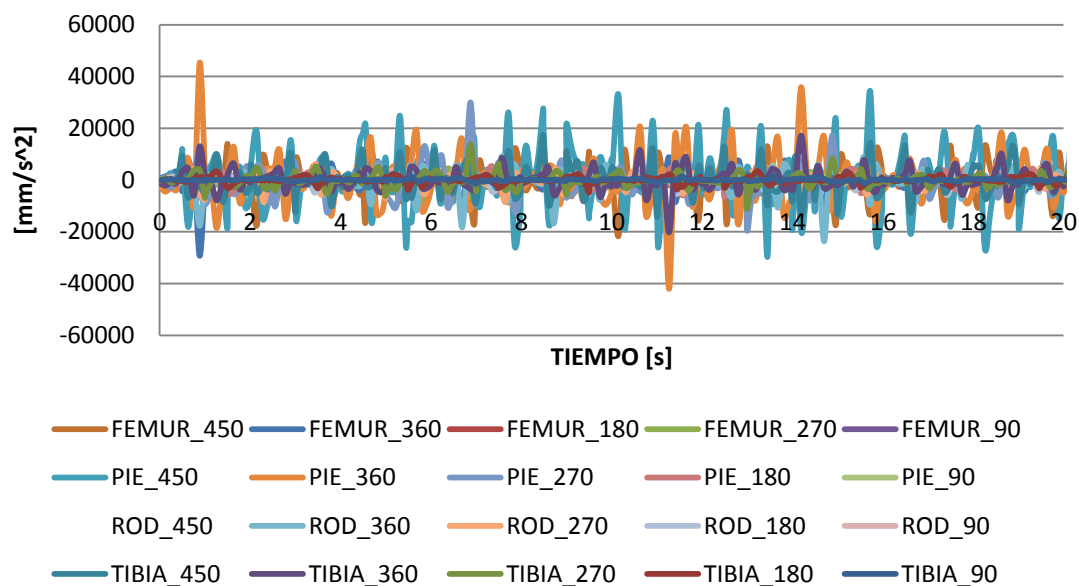
**IMAGEN 5.43.**

Como ejemplo en detalle se ha seleccionado en este caso el valor de giro de  $360^\circ$ . En el eje en cuestión vemos que aunque normalmente las gráficas con  $360^\circ$  de giro tienen variaciones de signo, al tratarse del plano vertical, es idéntico al resto. Los valores son mayores según aumenta la velocidad de giro y los picos también, directamente referenciando la cantidad de pasos realizados.

#### **5.4. COMPARACIÓN DE LAS ACELEARCIONES LINEALES DE LOS CDM**

La aceleración lineal es la que mide cuanto se acelera el robot con relación a la superficie sobre la cual se mueve. Esto mismo pasa con la velocidad lineal. En cambio, la velocidad angular y la aceleración angular miden las variaciones de los elementos dentro de la estructura mecánica del robot en sí.

#### **COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CDM\_X**



**IMAGEN 5.44.**

La aceleración lineal de los elementos en el eje X hace referencia a la aceleración generada por el Pasibot en el momento de desplazarse en la dirección de avance sobre la pierna izquierda en el proceso de la marcha. El plano X es la dirección de avance de nuestro sistema. Analizando la gráfica vemos que el mínimo que aparece hace referencia a la velocidad de 360°. Resulta curioso porque la aceleración suele ir directamente proporcional a la velocidad de giro del elemento motriz.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CDM\_X

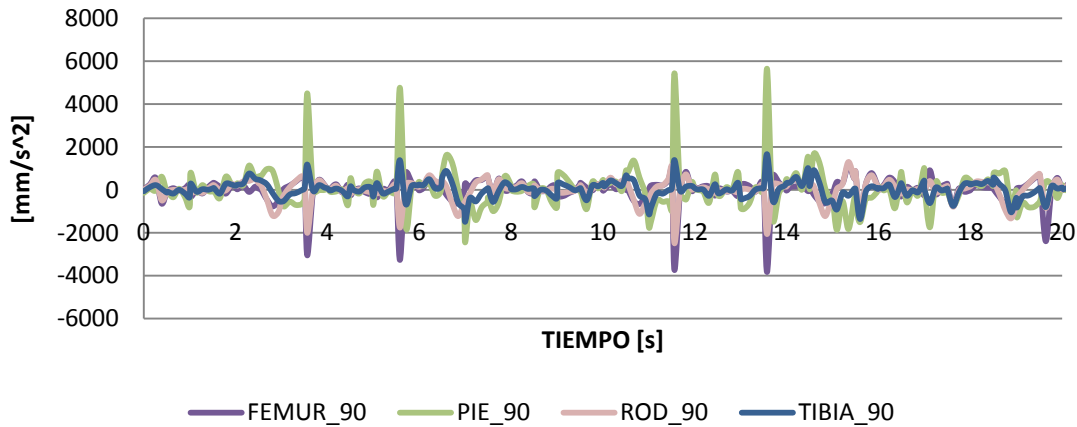


IMAGEN 5.45.

En las dos gráficas presentes se puede apreciar como en el plano X, la aceleración lineal corresponde a un ciclo determinado de todos los elementos. En el caso de la velocidad de giro de 90°/s se aprecian picos entre los segundos 3 y 7, y más adelante, entre los segundos 11 y 14. Los valores máximos difieren tanto en valor como en signo según el elemento, pero la posición donde se genera es idéntica para todos. Esto es una buena señal ya que si fuese distinta en cada elemento se tendría que ver el fallo correspondiente. En cambio, en la gráfica de 180°/s de giro, no hay ninguna singularidad y los ciclos son prácticamente idénticos, con variaciones pequeñas. Cabe destacar la diferencia de los rangos de la aceleración angular entre una y otra gráfica.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CDM\_X

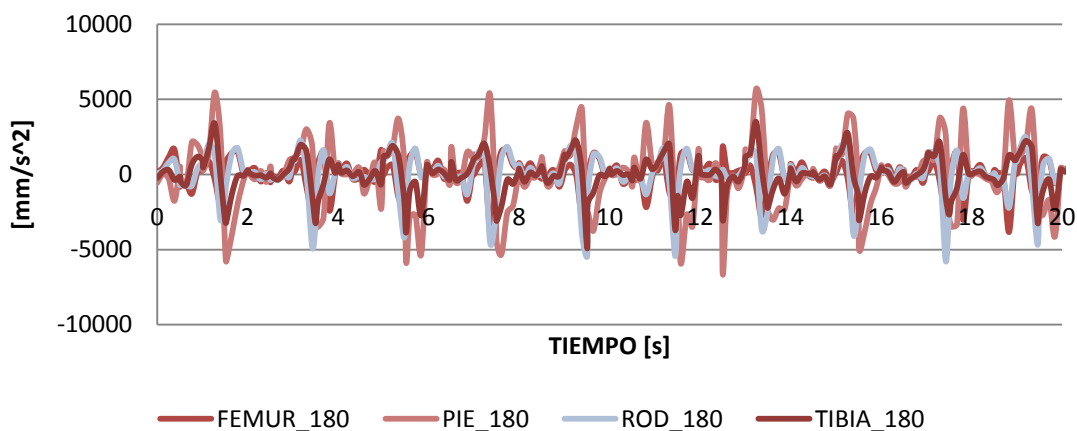


IMAGEN 5.46.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CDM\_X

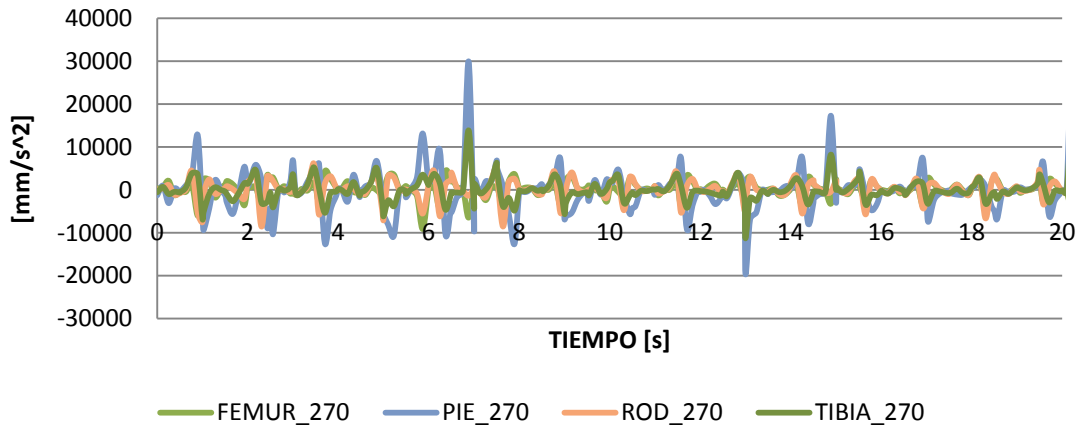


IMAGEN 5.47.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CDM\_X

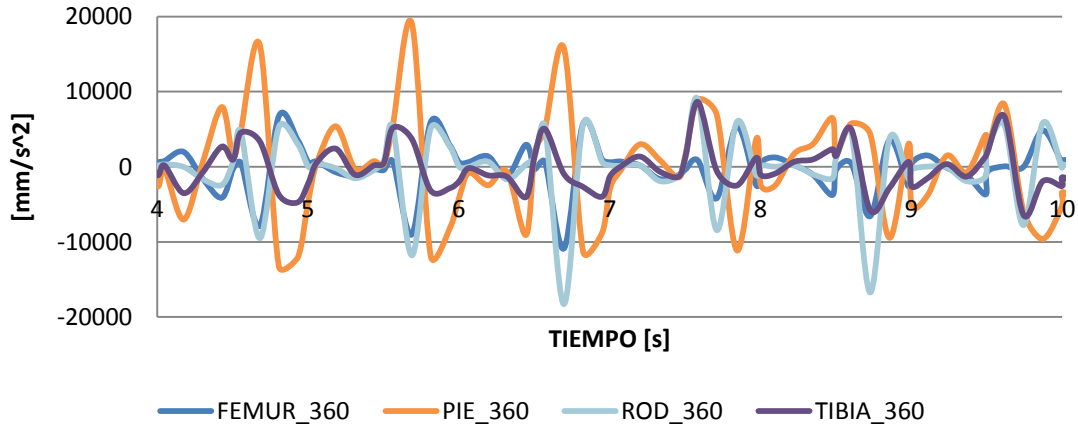


IMAGEN 5.48.

Analizando la velocidad de giro de 360°/s se puede apreciar como las aceleraciones van en descenso. Los tres primeros pasos una vez estabilizado el proceso de marcha son mucho mayores que los restantes, destacando la clara tendencia a la baja.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CDM\_X

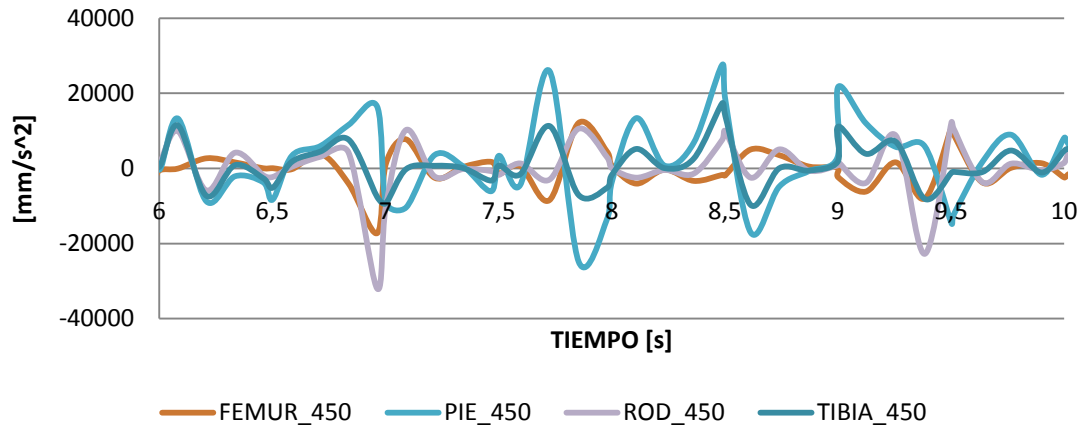


IMAGEN 5.49.

### EJE Y

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CDM\_Y

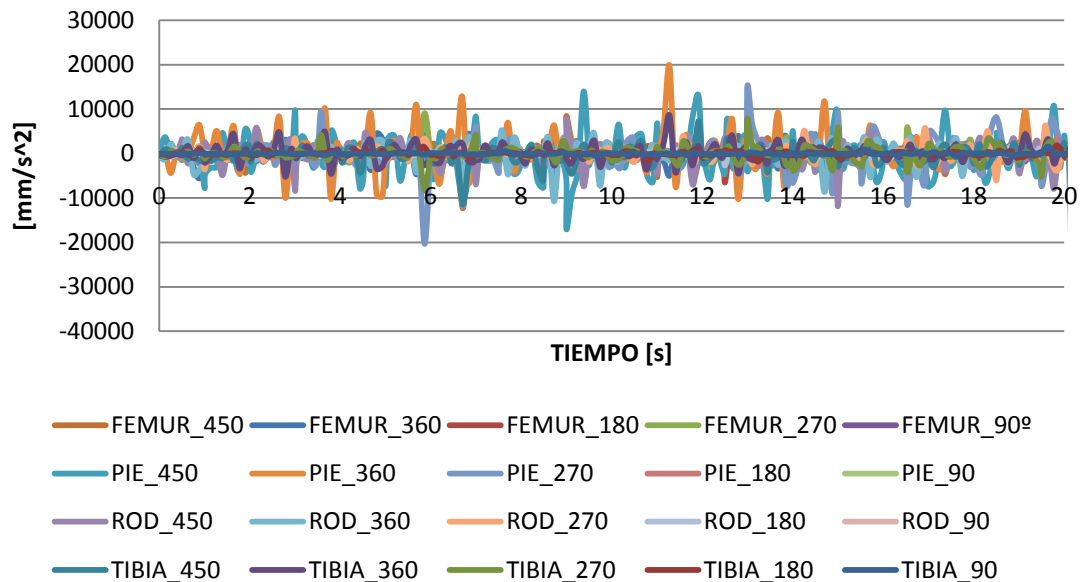


IMAGEN 5.50.

Si nos fijamos en las gráficas, tanto por separado como en la comparativa general, de la aceleración lineal en el eje Y, veremos gráficas muy similares en cuanto a forma. Aunque las gráficas tienen forma similar sus valores no lo son tanto. A partir de los 270° se regulariza la gráfica, siendo más homogénea y con picos menos destacados, o dicho de otra forma, más continuos.

En cuanto a los valores de 90° y 180°, son prácticamente planos con un máximo de aceleración negativa que destaca. Como es la tónica de todas las gráficas, el pico en cuestión es mayor según aumenta la velocidad de giro de nuestro mecanismo. La curiosidad es que todas las gráficas tienen un pico reseñable, y cada una lo tiene en punto distinto de su recorrido. Esto puede significar dos cosas. Una es la posible existencia de una particularidad en una parte determinada del elemento, y que por razones varias, una de las cuales puede ser el impacto percusivo contra una parte de la plataforma sobre la que camina, nos da dicho valor fuera de rango. La otra posibilidad es la de la existencia de un fallo de cálculo del programa, esto se puede comprobar discriminando las mediciones según los ciclos, comparando ciclo por ciclo y viendo si es una discontinuidad del programa o si es una particularidad de nuestro sistema bípodo.

Para terminar con esta serie de gráficas, vemos que los valores más reseñables en cuanto a la aceleración lineal del eje Y se dan para el caso de la velocidad de los 450°, es decir, a mayor velocidad, mayor será el valor de la aceleración lineal de los CDM en dicho eje.

A continuación se expondrán las gráficas limitadas en rango temporal quitando los puntos singulares, de este modo se verá mejor el comportamiento real del CDM de los elementos en cuestión a la velocidad determinada.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CDM\_Y

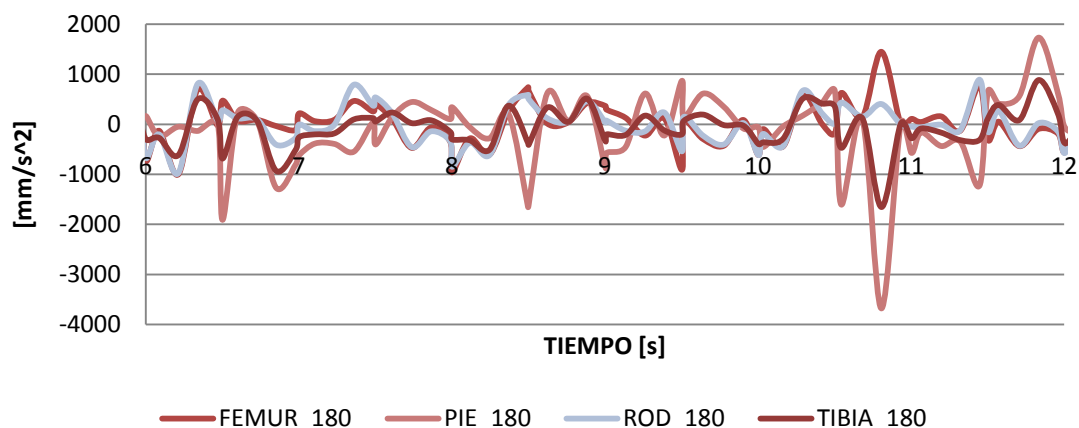


IMAGEN 5.51.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CDM\_Y

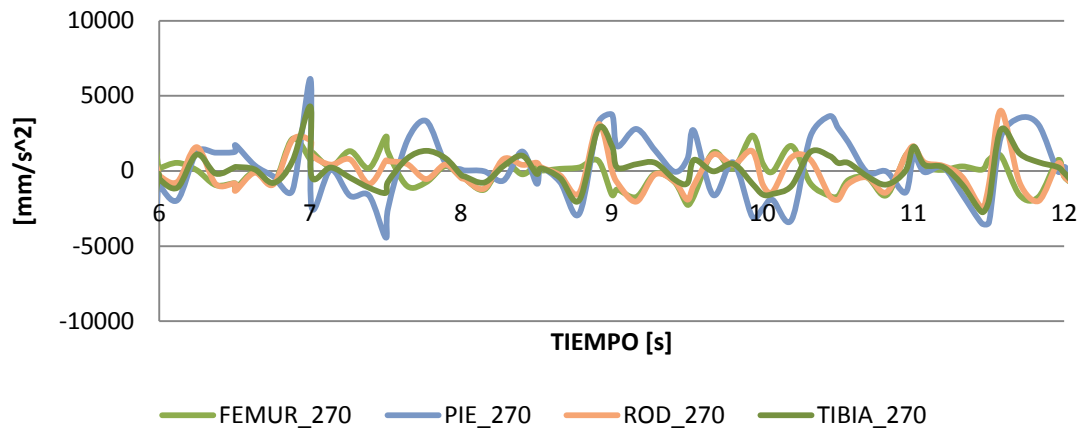


IMAGEN 5.52.

Como dato a resaltar de las gráficas expuestas, a parte de la genérica, es el hecho de que tanto en la gráfica de la velocidad de giro de 180°/s como en la de 450°/s hay un salto considerable. La diferencia se halla en el momento en que se produce en la línea temporal y el rango en cuestión. Como es lógico, cuando aumenta la velocidad de giro aumenta la aceleración lineal.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CDM\_Y

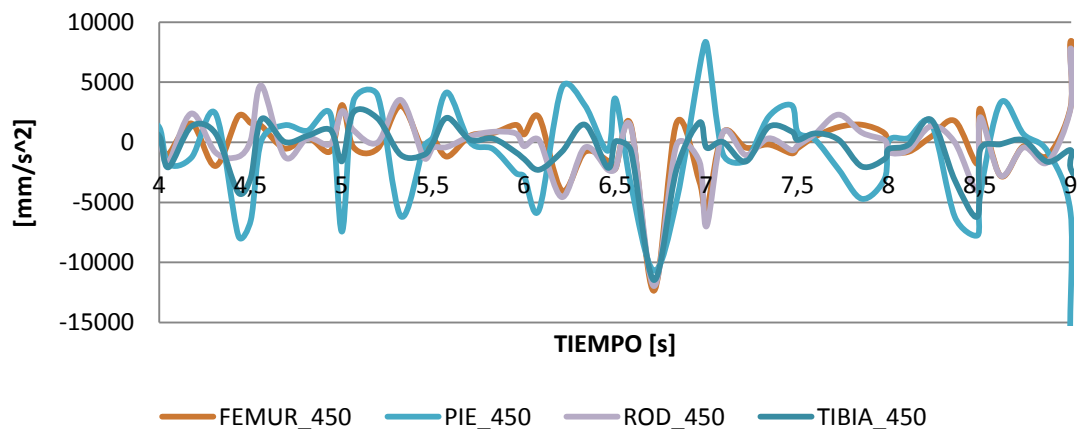
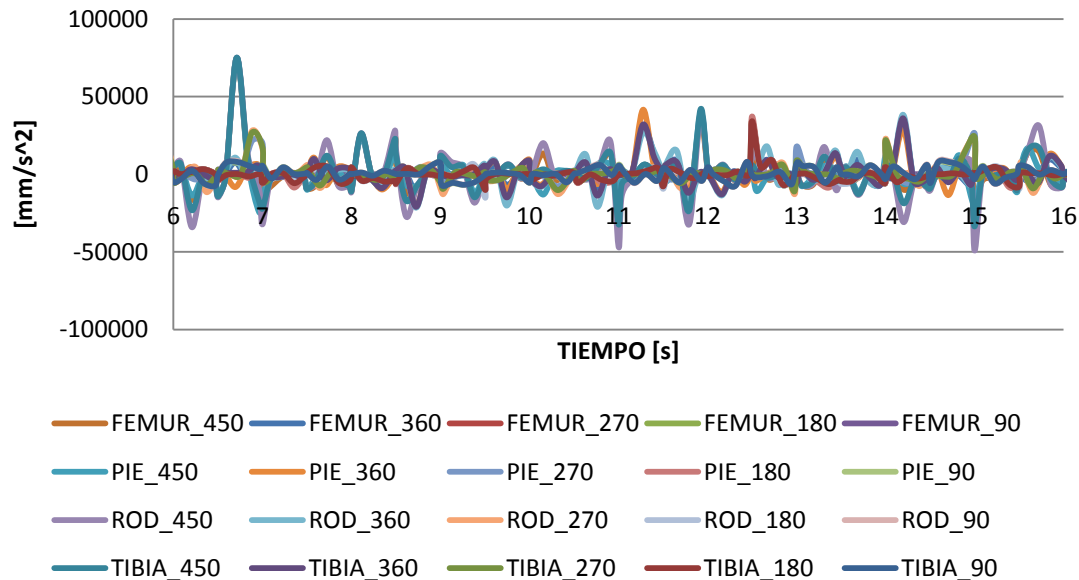


IMAGEN 5.53.

**EJE Z**  
**COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL**  
**CM\_Z**



**IMAGEN 5.54.**

Fijándonos bien en la gráfica, podemos ver que cada velocidad aplicada genera un punto en el cual hay una singularidad. La posición es distinta en cada uno de los casos y el valor también lo es. Si nos fijamos en la velocidad de 90°, el pico hace referencia a un valor de solo 134 [mm/s<sup>2</sup>], en cambio, cuando vas aumentando la velocidad de giro de la manivela hasta el valor de 450° vemos que el valor del pico es considerablemente más grande de 74 000 [mm/s<sup>2</sup>].

Según las gráficas podemos concluir que en el eje Z, la aceleración lineal va en aumento de manera directamente proporcional a la velocidad de giro de la manivela. Todas las gráficas tienen una singularidad representada como máximo que también está relacionada con la velocidad. Por último, el rango de valores para 180° y 270° es muy similar, cosa que pasa de igual manera con los 360° y 450°, siendo el rango de estos últimos casi el doble. Estas proximidades en valores se deben a que la cantidad de pasos entre estos rangos es muy similar, en cambio, saltando al siguiente conjunto, la cantidad de pasos es mucho mayor, y a su vez, aumenta la aceleración lineal.

A continuación aparecen las gráficas de cada velocidad por separado para poder ver con mayor detalle los elementos analizados.



## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CM\_Z

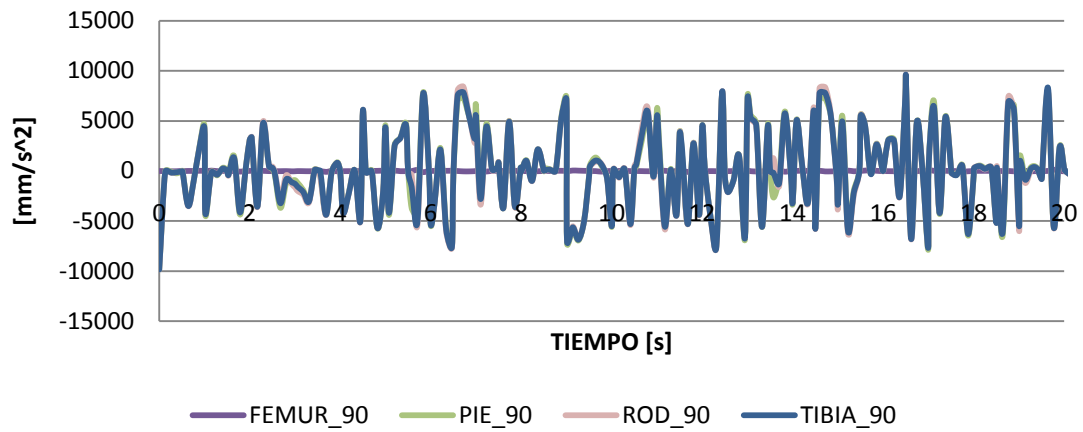


IMAGEN 5.55.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CM\_Z

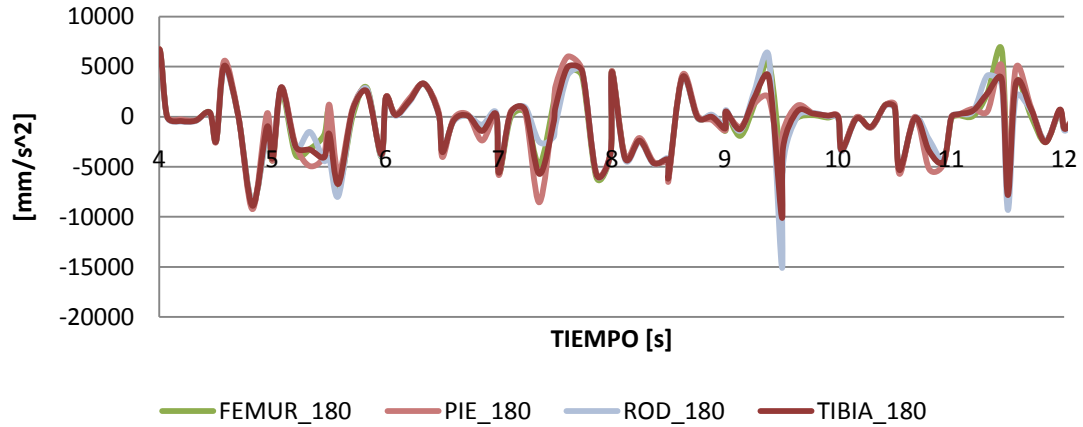


IMAGEN 5.56.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CM\_Z

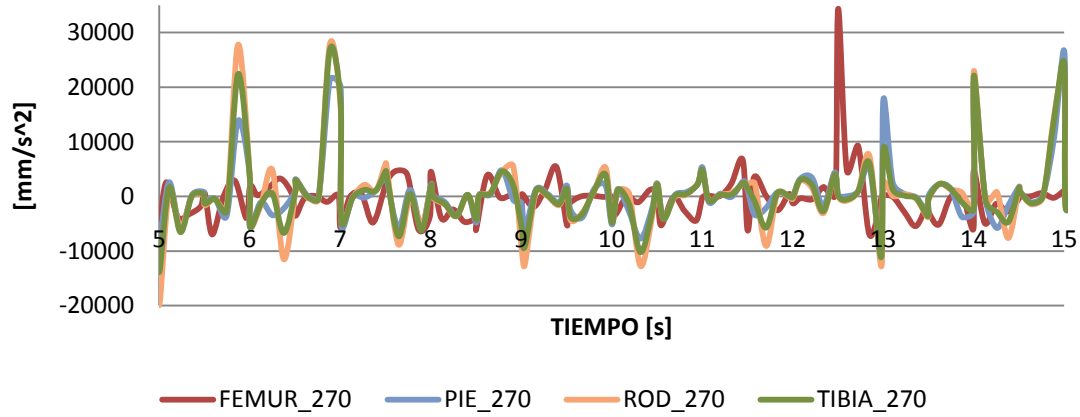


IMAGEN 5.57.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CM\_Z

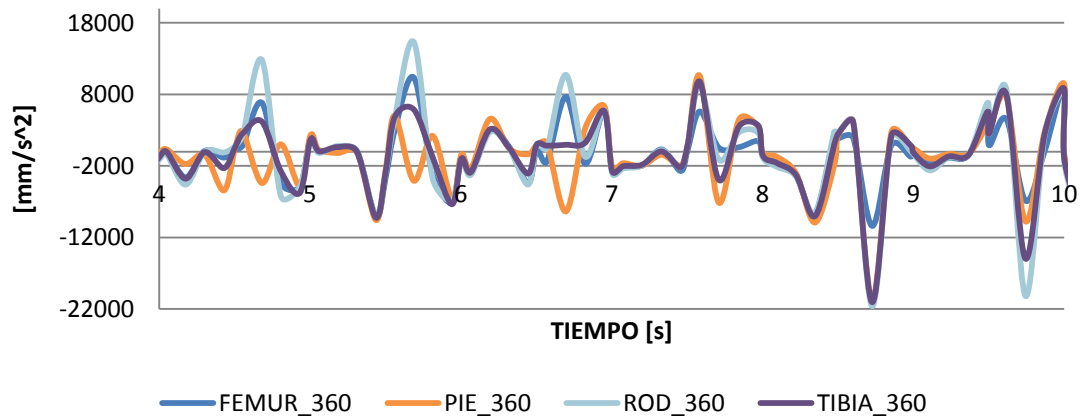
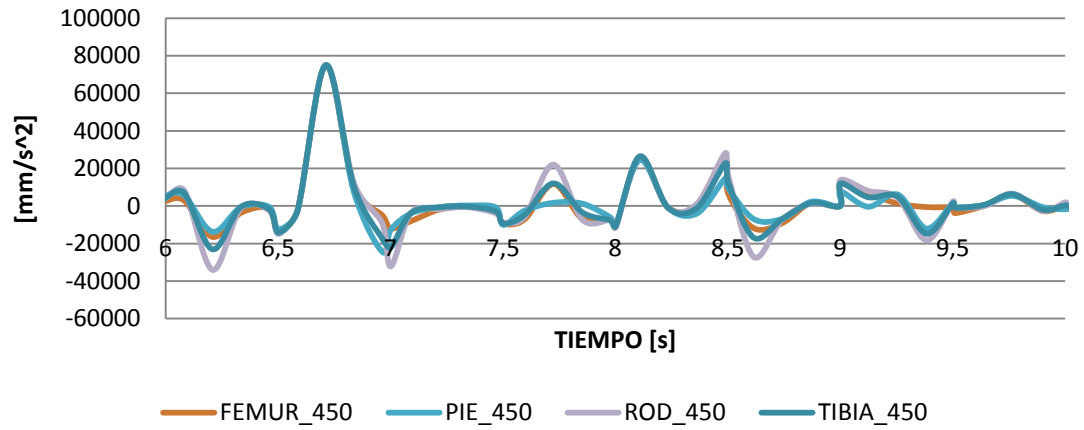


IMAGEN 5.58.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN LINEAL CM\_Z



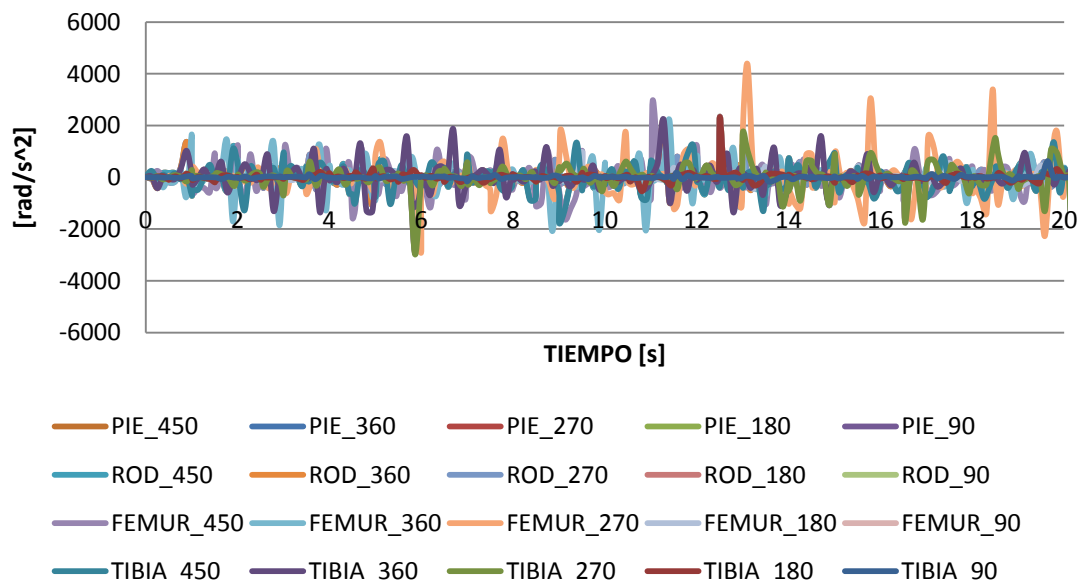
**IMAGEN 5.59.**

## **5.6. COMPARACIONES DE LAS ACELERACIONES ANGULARES DE LOS CM**

Al igual que pasa con las aceleraciones lineales, estas están directamente ligadas a la velocidad, debiéndose esto a que la aceleración angular es la derivada de la velocidad angular. La aceleración angular dictamina las variaciones de velocidad a lo largo de una trayectoria curva. En relación a nuestro bípodo, mide las variaciones de velocidad de los elementos que giran o que realizan un movimiento circular, es decir, todos.

### **EJE X**

## **COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_X**



**IMAGEN 5.60.**

En la gráfica del inicio de esta página se pueden apreciar las curvas de todos los CDM de los elementos en cuestión y para las distintas velocidades de giro. Este gráfico está expuesto para que se pueda apreciar el rango general y la superposición de elementos a las distintas velocidades de giro, pero no se puede sacar nada en concreto debido a la aglomeración de gráficas una sobre la otra. Por tanto, a continuación se destacarán las gráficas que más tengan que señalar y ver así el comportamiento más detallado.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_X

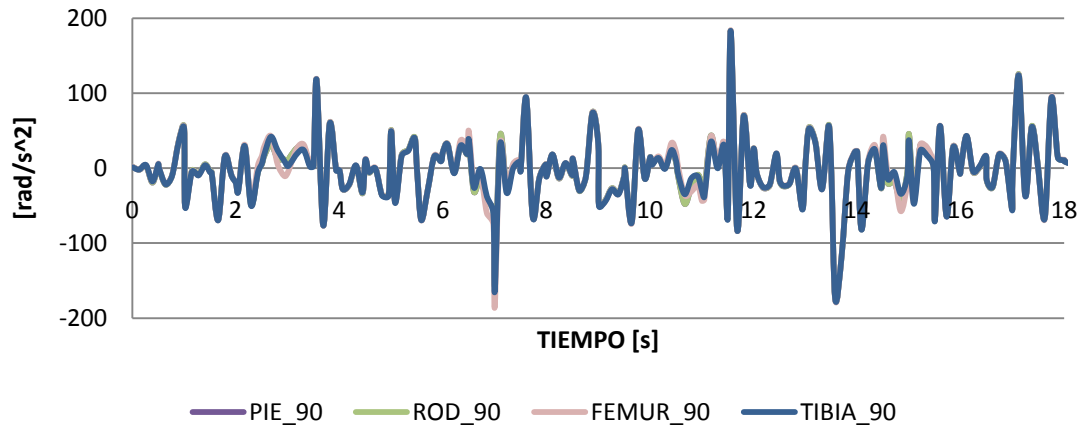


IMAGEN 5.61

En la gráfica comparativa referente a la velocidad de giro de 90°/s podemos ver que los valores de los cuatro elementos son prácticamente idénticos. Las variaciones son pequeñas y son del fémur que en el segundo 7 tiene un pico mayor que el resto pero nada reseñable debido al rango. Por último, los CDM de la rodilla y el pie tienen la misma aceleración angular en X. Viendo los parámetros analizados, es lógico que en la dirección X, que hace referencia al avance de la marcha, las aceleraciones angulares sean iguales, por lo menos para esta velocidad de giro que sigue una trayectoria mas bien recta.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_X

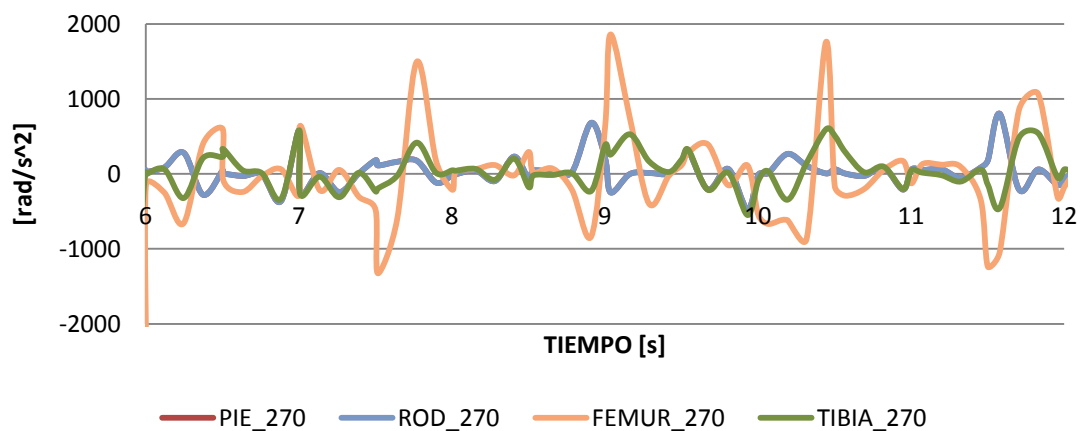
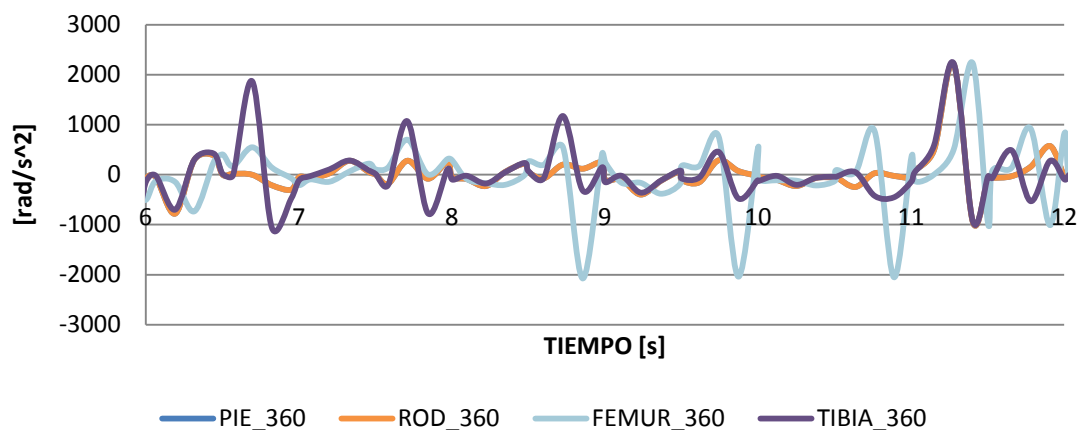


IMAGEN 5.62.

Para el caso de un giro de 270°/s vemos que ya existen más variaciones que en el caso anterior. Se ha suprimido la gráfica para los 180°/s de giro ya que la trayectoria es muy similar a los 90°/s y las diferencias son muy pocas. Las variaciones que existen en cuanto a las aceleraciones angulares de los elementos se deben a que la trayectoria no es nada recta, en cambio, la trayectoria se desplaza hacia uno de los lados. Como se ha visto en el análisis de la posición, para 270°/s, el Pasibot inicia una trayectoria curva hacia el lado derecho de la marcha. Por tanto, los elementos se ven acelerados más de un lado que de otro para poder generar ese desplazamiento, en caso de que no fuera así, no se desplazaría y la trayectoria sería parecida a la deseada, lo más recta posible.

### COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_X



**IMAGEN 5.63.**

Por último, se puede apreciar como la gráfica superior, la que hace referencia a un giro de 360°/s, se puede apreciar como a partir de los 8 segundos el fémur se empieza a acelerar con picos que tienden a valores negativos. Si recordamos los pasos realizados por el bípodo, recordamos que para dicha velocidad se desplaza a valores negativos, hacia el lado izquierdo, por tanto, a partir de los 8 segundos es cuando empieza de manera más marcada hacia la izquierda y se empieza a repetir cíclicamente en los tres siguientes pasos.

En la gráfica de 450°, en el proceso de dar los mismos pasos que en la anterior, no es apreciable ningún comportamiento cíclico, siendo las aceleraciones tanto positivas como negativas, acelerándose los elementos hacia ambos lados. Eso sí, la rodilla y el pie siempre con las mismas velocidades angulares.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_X

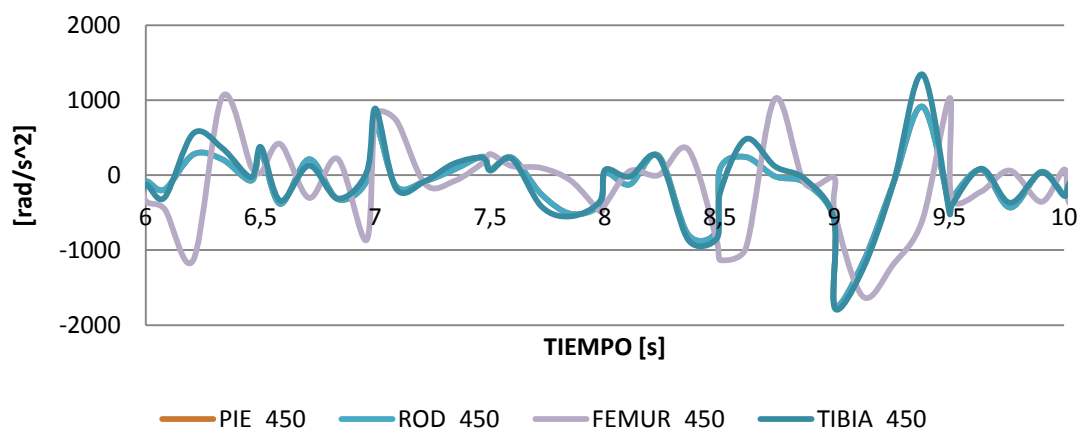


IMAGEN 5.64.

### EJE Y

## COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_Y

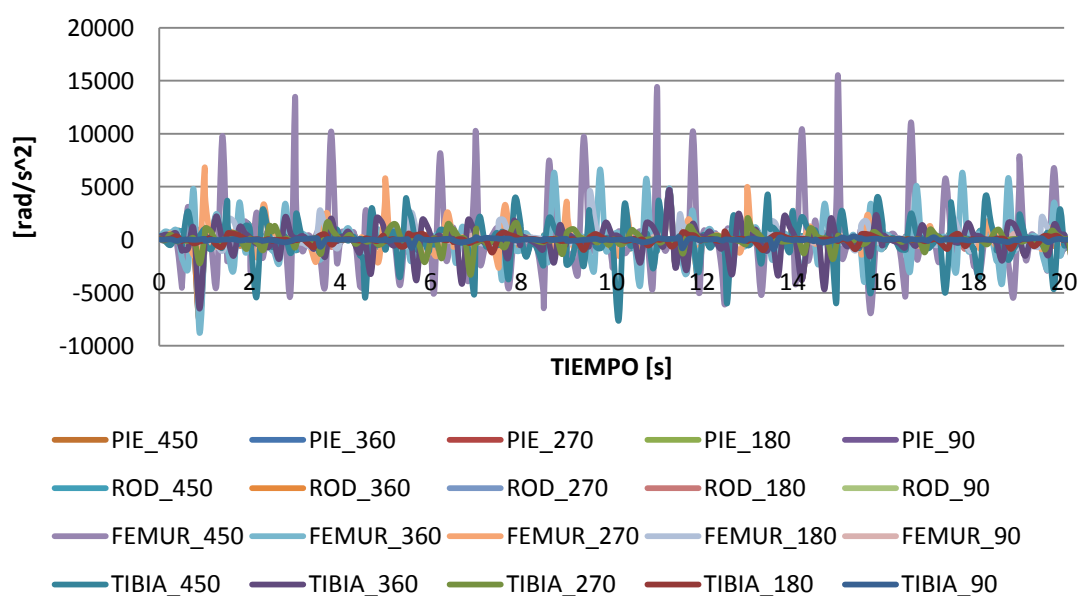


IMAGEN 5.65.

Las aceleraciones en el plano Y hacen referencia a los movimientos laterales. En otras palabras, las aceleraciones laterales de los CDM de cada elemento se aprecian en estas gráficas.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_Y

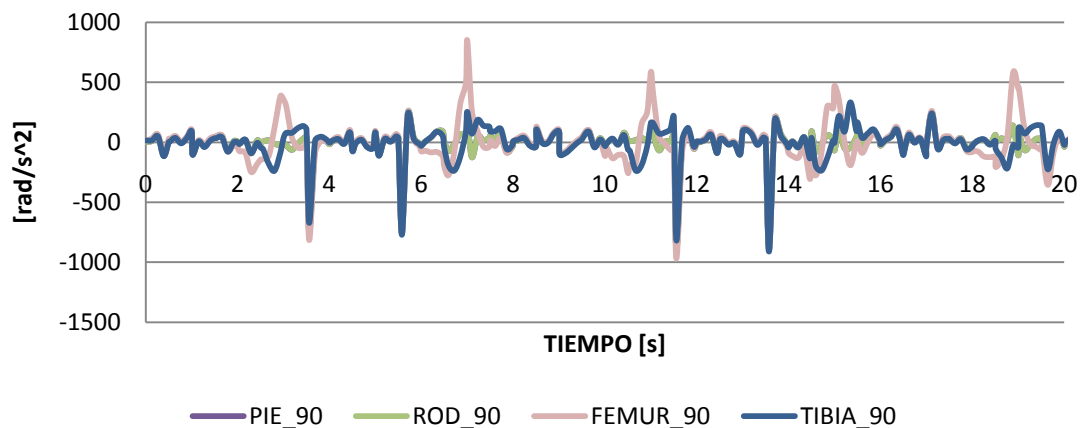


IMAGEN 5.66.

En referencia a la gráfica superior, vemos que para la velocidad de giro ahí indicada la gráfica de las aceleraciones angulares es cíclica. La tibia tiene dos picos de valor negativo entre los segundos 3 y 6 que se vuelve a repetir un poco más grandes entre los segundos 11 y 14. Si nos fijamos bien, el pie y la rodilla vuelven a coincidir como es debido. El fémur y la tibia tienen gráficas parecidas pero el fémur se ve más acelerado en valores positivos en ciertos momentos, los cuales son: 7, 11 y 19 segundos.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_Y

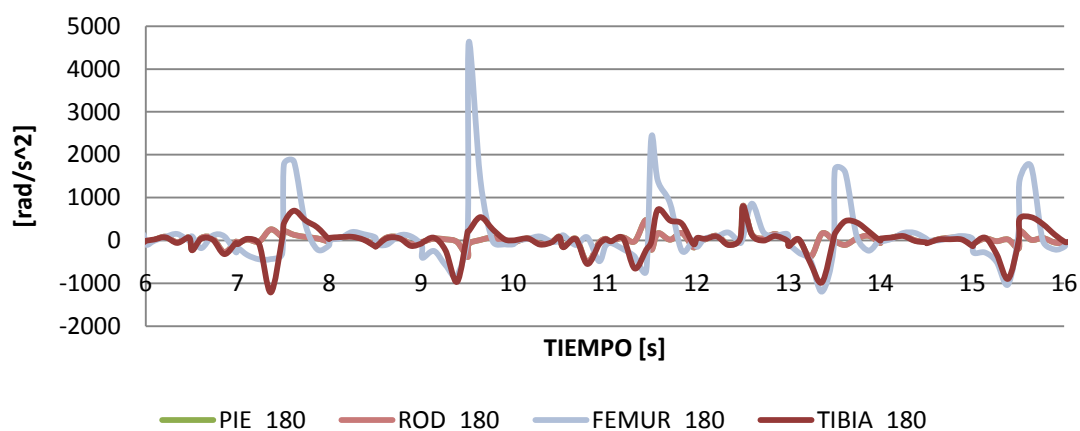


IMAGEN 5.67.



Para el caso de 180°/s vemos una diferencia en relación a las otras velocidades de giro. Los rangos del CDM del fémur son mucho mayores que los del resto de elementos. Se están midiendo rangos de  $[-1000, 1000]$   $[\text{rad/s}^2]$  en el resto de elementos, mientras que para el fémur se alcanza un rango de  $[-1000, 5000]$   $[\text{rad/s}^2]$ , mirándolo bien, son 4000  $[\text{rad/s}^2]$  más.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_Y

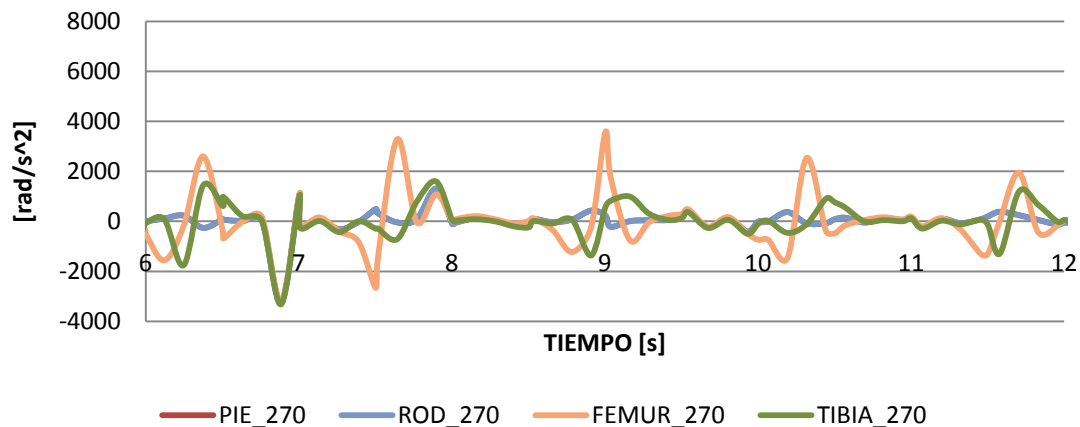


IMAGEN 5.68.

## COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_Y

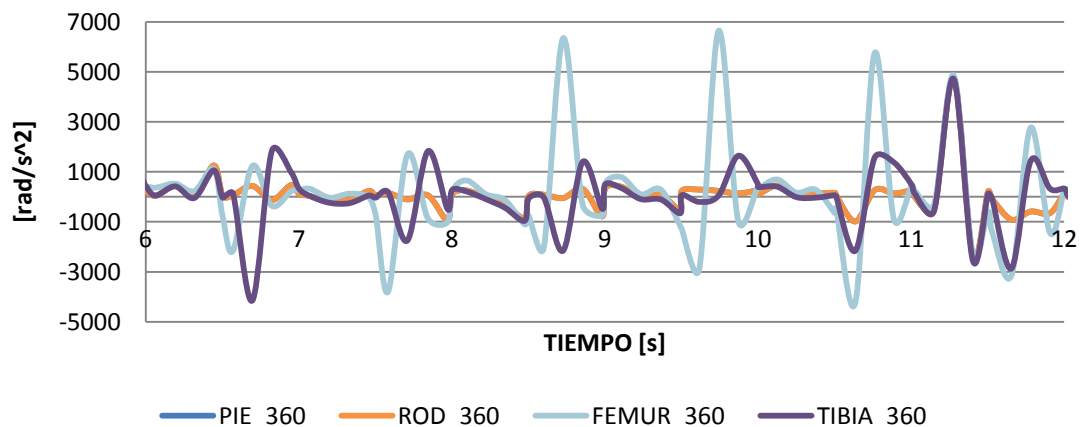


IMAGEN 5.69.

Para la gráfica con la velocidad de giro de 360°/s se ve una clara modificación del comportamiento. Como se puede apreciar en el resto gráficas de velocidades, quitando la gráfica para 450°/s que tiene un punto de cambio de sentido también, todas

tienen algo parecido a un ciclo que se repite. En otras palabras, se repite una tónica de máximos y a su vez del mismo signo. En cambio, para esta velocidad determinada, los valores empiezan siendo negativos, y a partir de los 8 segundos se pasan a valores positivos.

### COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_Y

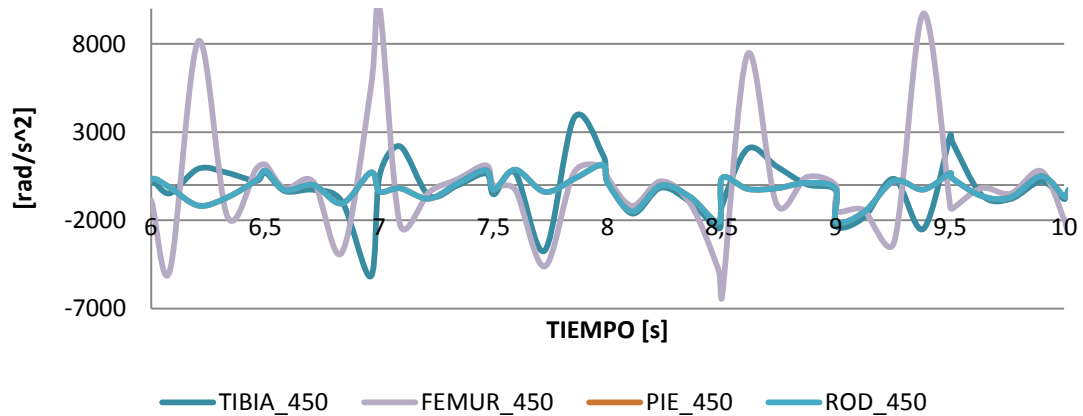
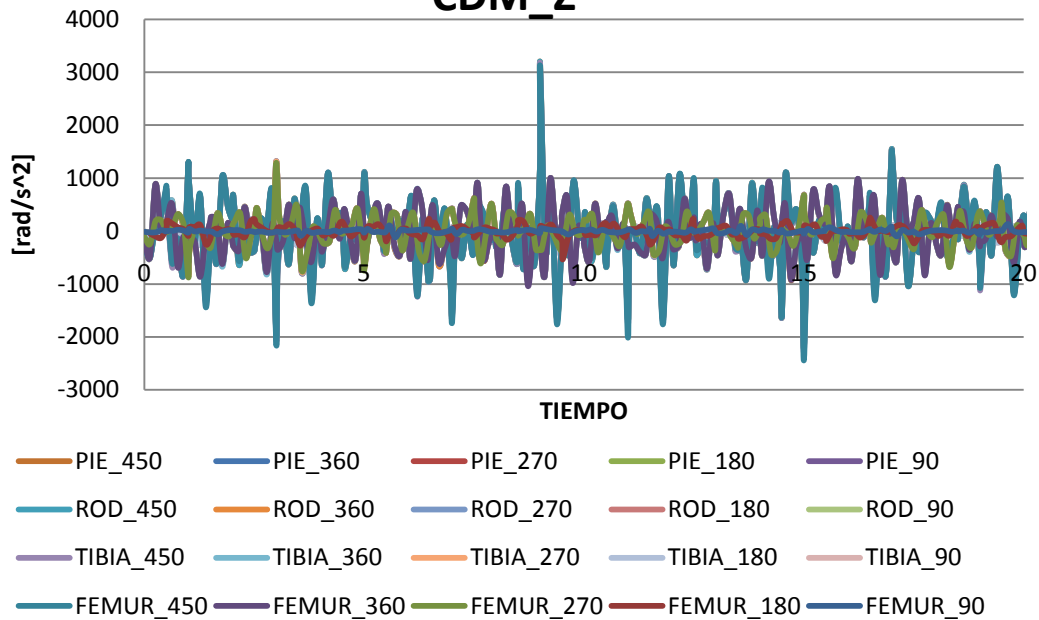


IMAGEN 5.70.

**EJE Z**

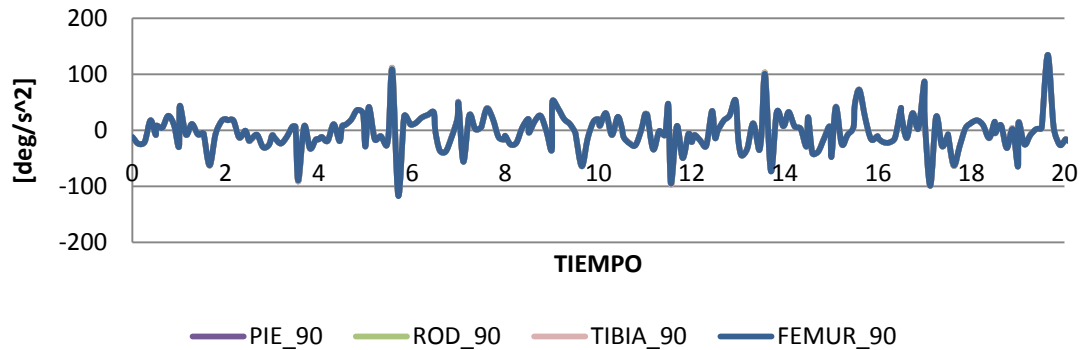
**COMPARACIONES ACELERACIÓN ANGULAR  
CDM\_Z**



**IMAGEN 5.71.**

En el caso del plano referenciado por el eje Z, es decir, la vertical, la facilidad de análisis es igual que en el resto de elementos. Todas las gráficas para una velocidad de giro determinada tienen la misma forma entre ellas, variando según varía la velocidad pero indistintamente del elemento en cuestión. Las variaciones de rangos también están patentes, pero no existe ninguna singularidad u otra cuestión que merezca resaltar. A continuación se adjuntarán un par de gráficas a distintas velocidades para que se pueda apreciar lo comentado en estas líneas y para dar una imagen general de las variaciones de rangos de medida.

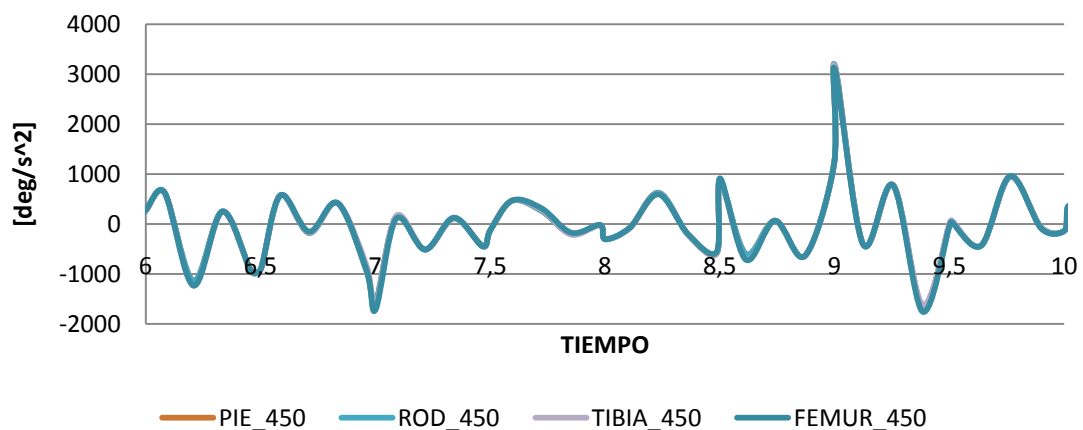
## COMPARCIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_Z



**IMAGEN 5.72.**

Fijándonos en las dos gráficas aquí expuestas, tanto la superior como la inferior, se puede apreciar que es la medida de todos los elementos en cuestión a dos velocidades determinadas. Arriba, para la velocidad de 90°, y abajo, para la velocidad de 450°, los dos extremos. Si nos fijamos, la forma varía, como es lógico ya que no siguen la misma secuencia debido a la cantidad de pasos y a la aceleración que conlleva una marcha más ligera, pero en ambos casos cíclica. Se puede apreciar en ambos casos que existe una única curva de aceleración angular que representa todos los elementos a una velocidad de giro determinada.

## COMPARCIONES ACELERACIÓN ANGULAR CDM\_Z



**IMAGEN 5.73.**

## **CAPÍTULO VI: Conclusiones y futuros desarrollos.**



## **CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES**

### **6.1. CONCLUSIONES**

Como parte final a este Proyecto de Fin de Carrera “Estudio del comportamiento de los CDM de los elementos básicos del bípodo PASIBOT”, se puede concluir que todos los objetivos propuestos fueron alcanzados de manera satisfactoria, arrojando resultados muy alentadores para los futuros desarrollos de este proyecto.

- Se ha modelado una copia exacta del PASIBOT utilizando herramientas informáticas. De hecho, se ha continuado los proyectos anteriores, encargados del rediseño del PASIBOT, y se ha procedido a montarlo en el software de simulación MSC ADAMS.
- Sobre este modelo virtual se ha procedido a realizar simulaciones y análisis. Se han medido todos los elementos a una velocidad genérica y luego se ha procedido a comparar los CDM de los elementos básicos a distintas velocidades para comprobar así su funcionamiento y ver en que rango de velocidades funciona mejor.
- Se ha comprobado, que a velocidades menores, en concreto 90°/s y 180°/s, la trayectoria del PASIBOT era lo más cercana a una trayectoria rectilínea. En cambio, al aumentar la velocidad de giro, los desplazamientos eran muy grandes y no se acercaba a la trayectoria deseada.
- Se ha medido de manera satisfactoria los elementos dinámicos del PASIBOT y se ha procedido a un análisis más en detalle, facilitando así la información para futuras mejoras.

En definitiva, el objetivo de este Proyecto de Fin de Carrera ha sido alcanzado. No solo se han proporcionado las simulaciones y las gráficas correspondientes a las mediciones realizadas, sino que también se han sacado los datos numéricos para futuros ajustes dinámicos.

## **6.2. FUTUROS DESARROLLOS**

Una vez finalizada la exposición del proceso de desarrollo, el análisis de los resultados y comentadas las conclusiones, es necesario indicar las posible vías de investigación más allá de este proyecto. Como se ha comentado al principio de este documento, este proyecto viene como evolución de otros proyectos previos, y servirá como base para futuras evoluciones analizadas en otros proyectos. Los futuros proyectos propuestos para mejorar el funcionamiento del PASIBOT son los siguientes:

- **Realizar un estudio idéntico al actual** aprovechando el diseño del Pasibot existente que incorpora actuadores de alargamiento y acortamiento de la zancada.
- **Descender el CDM.** Esta propuesta también implica un rediseño de algunas partes del robot, como por ejemplo la cadera. Cuanto más próximo se encuentre el CDM del suelo, mayor será su estabilidad, tanto longitudinal como transversal.
- **Realización de un modelo analítico:** Se debería realizar un modelo analítico dinámico del nuevo sistema de transmisión, integrado en el mecanismo completo del robot y compararlo con el modelo con el sistema de transmisión anterior.



## CAPÍTULO VII: Presupuesto



## **CAPÍTULO VII: PRESUPUESTO**

### **7.1. PRESUPUESTO**

Para la realización de este proyecto, se han tomado en cuenta una serie de herramientas. Estas herramientas, por mucho que estén disponibles en la facultad, conllevan un coste de utilización y de mantenimiento. Para poder hacer un presupuesto real y detallado con relación a las labores realizadas a lo largo de este proyecto, es necesario primero resaltar las fases del proyecto y el tiempo de consecución de cada una de las mismas. A continuación se enumerarán los procesos en los que se ha entrado en detalle como parte del proyecto.

1. Planteamiento de los objetivos del Proyecto de Fin de Carrera (2 semanas).

En esta fase inicial, el trabajo tangible es prácticamente nulo. Consiste en un proceso de aproximación. Primero es necesario aproximarse al profesor, luego a la materia y por último, una vez entendido el concepto general y habiendo visto en qué punto se quedaron los proyectos anteriores, plantear los objetivos que se buscan conseguir.

2. Recogida de información (10 semanas).

Esta fase es un complemento a la inicial. Tampoco se avanza de manera tangible pero si se hace en el plano conceptual. Este proceso consiste en documentarse sobre el tema en cuestión. Se ha accedido a publicaciones, artículos, páginas web orientadas a la robótica, y principalmente a los proyectos de Fin de Carrera previos, siendo estos los que más información y detalles han aportado.

3. Herramientas de simulación (10 semanas).

En esta fase del proceso se ha accedido a los programas con los que se trabajaron posteriormente. Conocimientos de Solid Edge se poseían pero fue necesario refrescarlos. En cambio, enfrentarse con el programa MSC ADAMS fue mas complejo. En este periodo se exportaron las piezas desde Solid Edge para luego montarlas en MSC ADAMS. Una vez trabajando con MSC ADAMS se ha procedido a la simulación, constantemente modificando y midiendo parámetros.

4. Postprocesado (6 semanas).

Esta fase ha consistido en analizar los valores hallados en las simulaciones del simulador de MSC ADAMS. Ha consistido en exportar los valores y posteriormente representarlos de manera gráfica para ver de modo más visual los efectos medidos.

5. Análisis y comparación de resultados (6 semanas).

Esta fase ha sido quizás la más importante de todo el desarrollo del presente proyecto. Ha consistido en analizar y evaluar las gráficas halladas con relación a los datos conseguidos del simulador. Es en esta fase donde se han sacado las conclusiones y se ha procedido a la redacción de la presente memoria.

**TABLA 7.1. Línea temporal del proyecto.**

FASE	1	2	3	4	5
SEMANAS	1-2	2-22	22-32	32-38	38-42

## **7.2. COSTES**

Para la realización de este PFC han hecho falta una serie de herramientas. Una estación de trabajo que constase de los programas Solid Edge ST y MSC.Adams. El coste de la estación de trabajo, contando con que no será destinado únicamente al diseño que aquí se trata, oscilará alrededor de 2000 €. A dicho coste se le debe añadir el precio de la impresora laser a color que tiene un valor de 480 €. A todo el equipo se le presupone una depreciación de 24 meses, dedicándole un total de 6 meses al uso de dichos equipos.

Al coste del equipo se le debe añadir el coste de la licencia del Solid Edge ST y del MSC.Adams, que tienen un coste de 6000 y 15000 euros respectivamente. A ambos programas se le presupone una amortización de 1/6.

A lo largo de los nueve meses que se han dedicado a la realización de este proyecto, se ha dividido el tiempo en: 270 horas al diseño y la simulación del Robot PASIBOT con ambos programas, y 53 horas a la redacción de la memoria completa. El salario de un ingeniero con las facultades para realizar el diseño y la simulación con ambos programas es de 80 euros por hora, mientras que para la redacción de la memoria el coste de un ingeniero es de 35 euros por hora.

**TABLA 7.2. Tabla detallada de los costes del proyecto.**

PERSONAL			
Descripción	Horas	Coste por hora (€/h)	Coste imputable (€)
Diseño en Solid Edge ST	120	80	9600
Diseño y simulación en MSC.Adams	150	80	12000
Redacción	53	35	1855
1EQUIPO[1]			
Descripción	Coste (€)		Coste imputable (€)[2]
Ordenador	2000		500
Impresora Laser	480		120
SOFTWARE[3]			
Programa	Coste licencia por año (€/año)		Coste imputable (€)
Licencia Solid Edge ST	6000		1000
Licencia MSC.Adams	15000		2500
SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS			
Descripción			Coste imputable (€)
Gastos de material de oficina e impresión del documentos			280
COSTE TOTAL			27855

[1] La depreciación del equipo se realiza en 24 meses, dedicándole un uso máximo de 6 meses.

[2] Precio del equipo según el uso en función de la depreciación.

[3] El software tiene una amortización de 1/6.



El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de €27 855.00

Leganés a X de Agosto de 2003

El ingeniero proyectista

Fdo. Bruno Gattamorta Monteagudo





## CAPÍTULO VIII: Bibliografía



## **CAPÍTULO VIII: Bibliografía**

Paginas web visitadas con fecha de visita.

- [1] <http://mimosa.pntic.mec.es/jgomez53/matema/conocer/chebyshev.htm>  
Última visita (07/10/2010)
- [2] <http://es.wikipedia.org/wiki/Pantógrafo>  
Última visita (07/10/2010)
- [3] <http://www.protdesign.com/Synchronous%20Technology.pdf>  
Última visita (07/10/2010)
- [4] <http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/Adams.aspx>  
Última visita (02/11/2010)
- [5] <http://www.monografias.com/trabajos6/larobo/larobo.shtml>  
Última visita (09/01/2011)
- [6] <http://www.roboticspot.com/especial/historia/his2004a.php>  
Última visita (13/11/2010)
- [7] [http://www.cienciapopular.com/n/Tecnologia/Androides\\_Humanoides\\_y\\_Cyborgs/Androides\\_Humanoides\\_y\\_Cyborgs.php](http://www.cienciapopular.com/n/Tecnologia/Androides_Humanoides_y_Cyborgs/Androides_Humanoides_y_Cyborgs.php)  
Última visita (09/11/2010)
- [8] <http://automata.cps.unizar.es/robotica/INTRODUCCION.pdf>  
Última visita (15/10/2010)
- [9] <http://roboticasinsecretos.blogspot.com/2007/10/comienzos-de-la-robotica.html>  
Última visita (15/11/2010)
- [10] <http://roboticajoven.mendoza.edu.ar/historia.htm>  
Última visita (22/10/2010)
- [11] [http://en.wikipedia.org/wiki/Karel\\_%C4%8Capek](http://en.wikipedia.org/wiki/Karel_%C4%8Capek)  
Última visita (07/07/2011)
- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Zero\\_Moment\\_Point](http://en.wikipedia.org/wiki/Zero_Moment_Point)  
Última visita (12/07/2011)

[13] Dr. Carlos Arce: Analisis-Biomecanico-de-la-Marcha

[www.arcesw.com](http://www.arcesw.com) , Perú , 2009

Última visita (11/07/2011)

[14] J. A. Porro (\*), C. Molpeceres, M. Morales, J. L. Ocaña: *Generación de un campo de tensiones residuales de compresión en Aluminio 2024-T351 mediante tratamiento por onda de choque generada por laser*. UPM E.T.S.I.I.-UPM. 2007.

Última visita (07/08/2010)

<http://www.arcesw.com>

### **Publicaciones:**

VERA LUNA, Pedro: *Biomecánica de la marcha humana normal y patológica*, Valencia, editorial IBV, 1999.

PFC: HERNÁNDEZ MOLINA, Carlos: *Análisis del vuelco lateral del robot PASIBOT. Diseño de un mecanismo compensador*, Universidad Carlos III, Madrid, 2009.

PFC: CORRAL ABAD, Eduardo: *Análisis mecánico del robot bípodo "PASIBOT"*. Universidad Carlos III, Madrid, 2009.

PFC: ESPANTOSO MIRANDA, VICTOR: *Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral*. Universidad Carlos III, Madrid, 2009.

PFC: Garcia De Oteyza Hafner, Óscar: *Diseño y análisis de un nuevo sistema de estabilización para el robot bípodo pasibot*. Universidad Carlos III, Madrid, 2010.

PFC: Redondo Perales, Alejandro: *Análisis y simulación del comportamiento del robot bípodo pasibot*. Universidad Carlos III, Madrid, 2009.